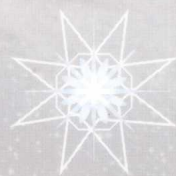
Jichu Tianwenxue Jiaocheng

◆ 邵华木 主 编
◆ 汪 青 副主编

基础天文学教程

安徽人民出版社

安徽师范大学教材建设基金资助项目

基础天文学教程

邵华木　主　编
汪　青　副主编

安徽人民出版社

内容简介

本书介绍了天文学基础知识，包括天球坐标系、四季星空、时间与历法、地月系、太阳系、恒星、银河系、河外星系、总星系、宇宙学以及地外文明探索等内容。

全书语言清新流畅，文字简明扼要，具有普及性、系统性、时代性和适用性的特点。读者可从本书中学习和掌握基本的天文学知识，了解天文学科学的发展，进而对天体、宇宙等天文现象产生浓厚的兴趣，从而树立科学的宇宙观。

本书适用于高等师范院校地理系师生、非天文专业高等学校师生，以及广大天文爱好者，可作为高等学校非天文专业本科生选修天文学课程的教材和高等学校素质教育课程的基础教材。

图书在版编目(CIP)数据

基础天文学教程／邵华木 主编．—合肥：安徽人民出版社，2008.8

ISBN 978-7-212-03324-8

Ⅰ.基… Ⅱ.邵… Ⅲ.天文学—教材 Ⅳ.P1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第105859号

基础天文学教程

邵华木　主　编

汪　青　副主编

出版发行：安徽人民出版社

地　　址：合肥市政务文化新区圣泉路1118号出版传媒大厦8楼

发 行 部：0551-3533258 3533268 3533292(传真)　　邮编：230071

组　　编：安徽师范大学编辑部　　电话：0553-3883578　　3883579

经　　销：新华书店

印　　刷：安徽芜湖新欣传媒有限公司

开　　本：787×960　　1/16　　印张：15　　字数：277千

版　　次：2008年8月第1版　　2008年8月第1次印刷

标准书号：ISBN 978-7-212-03324-8

定　　价：27.00元

前　言

随着我国经济迅速崛起,国家对素质教育愈来愈重视。1999年6月,党中央和国务院召开了改革开放以来第三次全国教育工作会议,颁布了一个纲领性文件——《关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》,把全面推进素质教育作为迎接新世纪教育工作的战略重点,把提高创新能力摆到了关系民族复兴和国家兴旺的重要位置。实施素质教育,就是全面贯彻党的教育方针,以提高国民素质为根本宗旨,以培养学生的创新精神和实践能力为重点,造就"有理想、有道德、有文化、有纪律"的、德智体美等全面发展的社会主义事业建设者和接班人。随着素质教育的推进,在高校开设一系列选修课是全面提高大学生素质的重要措施之一。

天文学是六大自然基础学科之一,对其它相关自然科学的发展起着至关重要的作用,即使是一些社会学科,也需要天文学研究成果的支撑。因此,师范院校的学生掌握一些天文学基础知识,既是提高自身素质、培养和树立正确世界观的需要,也为今后走上中学讲坛、培养和提高中学生素质做一些知识积累。为此,我们编写了《基础天文学教程》,期望在学生素质教育和普及天文学基础知识方面作一点贡献。

本书最大特点:第一是普及性。针对大学生对天文知识普遍知之不多的现象,本书着重介绍一些最基本的天文知识,注重由浅入深、由近及远、删繁就简,没有深奥的数学和物理公式,把一些难以理解的知识用浅显的语言化解并表达出来,便于学生掌握。第二是系统性。天文学是古老的科学,又是最活跃的前沿科学之一,经过长期研究和发展,已形成较为系统的学科,本书在采取一些简化措施时,充分考虑和保持其系统性,在全书的结构上尽量体现出合理性,层次上体现逻辑性。第三是时代性。天文学这一科学的发展是逐渐完善的,虽然有许多经典理论,但随着科学技术的进步,天文学探测手段不断进步和完善,天文学一些新理论和新的探测成果也应运而生,本书亦尽量反映这方面的最新资料。第四是适用性。目前,高等师范院校单科选修课的学时数普遍较少,本书考虑到这一因素,在保证系统性和科学性前提下,压缩篇幅,使之更便于在教学上应用。另外,本书还附有复习思考题和若干附录,便于学生课后思考和自学,以巩固所学知识。

本书共分六章,第一章至第四章第四节由邵华木编写,第四章第五节至第六章及附录由汪青编写,全书部分图件由汪青制作。在编写过程中,参考或引用了许多同行前辈和专家专著中的图表和科研成果等内容资料,在此,我们表示衷心感谢。

本书主要面向高校特别是师范院校学生及广大对天文学比较感兴趣的一般社会读者。

邵华木

2008 年 5 月 12 日

目　录

第一章　天文观测基础知识

本章是天文学知识的基础。要进行天文观测并描述或确定天体在天球上的视位置和视运动，必须掌握天球坐标系相关知识。本章还介绍由于地球的自转和公转而造成的两种基本的视运动：天体的周日运动和太阳的周年运动，及由这两种基本的视运动所造成的四季星空的变化。

第一节　天球和天球坐标

仰望天空，我们的直观感觉是天空呈球面状，星星布满天空，而且所有的星星好像离我们都是一样远。有了这样的直观认识，我们就可以把人们能直接观测到的地平面之上的半个球形天空即天穹作为基础来定义天球，并把天体的视位置在天球上用天球坐标来给予定位。

一、天　球

天球是天文学上为研究天体位置和运动的方便假想的以观测者或地心或日心为中心，以无穷远为半径的球。由于天球球心的不同，有观测者天球、地心天球和日心天球之分，其中：地心天球就是我们通常所说的天球，主要用于研究太阳系以外的天体的视位置和视运动；日心天球主要用于研究太阳系内天体的视位置和视运动。我们知道，地球半径和日地距离都是有限距离，相对于天球无穷远半径来说是可以忽略的，因此，上述各种天球只是由于研究问题的需要而人为确定的，实际上天球的球面可以看作是唯一的。

天球的一个重要作用是可以表示天体的视位置。天体的实际位置不仅方向不同，而且有远有近，但是我们所看到的天体，距离观测者好象都是一样的远，这是因为这些天体在天球上投影的结果。我们把天体在天球上的投影叫做天体的视位置（图 1-1）。

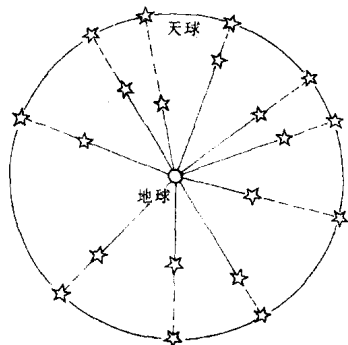



图 1-1　天球和天体的实际位置与视位置

天球的另一个重要作用是可以表示天体的视运动。比如,由于地球绕地轴自西向东自转,在视觉无法直接感觉到的情况下,我们所能看到的是天球的自东向西旋转(称为天球的周日视运动)。其直接的表现就是天体的东升西落(称为天体的周日视运动)。显然,两者都是地球自转的反映,是与地球自转相对运动的表现。再比如,地球自转的同时还自西向东绕太阳公转,这种运动的直观感觉是夜晚星空以一年为周期的有序变化。当然,在我们的视觉习惯中,倒认为太阳在天球上以相同的方向和周期作运动(图 1–2),因而称为太阳周年(视)运动,其视运动轨迹称为黄道。

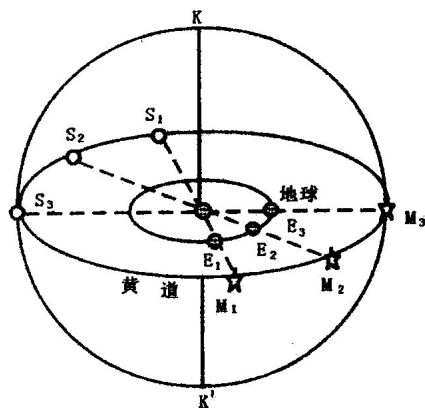



图 1–2 地球绕太阳公转与太阳的周年视运动

二、天球上常用的圈和点

要在天球上确定天体的位置,必须建立坐标。坐标的要素是线及线构成的点,对球面而言,这些线就是圆或一段弧,这些点就是这些圆或弧的交点。

1. 天极和天赤道

地球自转轴无限延长即为天轴,天轴与天球的两个交点就是天极,其中与地球北极对应的称天北极(用 P 表示,也有称“北天极”),与地球南极对应的称天南极(用 P′表示,也有称“南天极”,图 1–3)。小熊座 α 星(中名勾陈一)位于天北极附近,因而被称为北极星,虽然它不很亮,但却很有用。

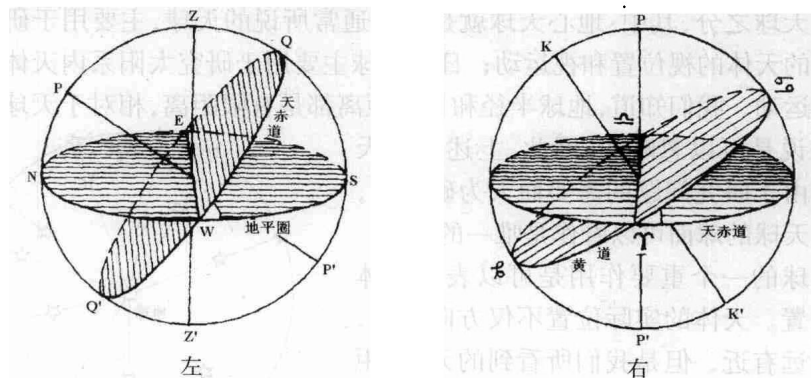



图 1–3 天球上常用的圈和点

天赤道是过天球球心且垂直于天轴的平面与天球相割的大圆。由于地球赤道和天赤道在一个平面上,因而天赤道也可看作是地球赤道在天球上的投影。天

赤道与两天极等距,并将天球分割成南、北相等的两部分。天赤道所在的平面称为天赤道面。

2. 天顶、天底和地平圈

观测者所在点的铅垂线无限延伸与天球有两个交点，其中与观测者头顶相对应的交点称为天顶(用 Z 表示,图 1-3 左),天体到天顶之间的角距离称为天顶距(Z_0);另一个交点即与观测者脚底所对应的交点称为天底(Z′)。

地平圈是过天球球心且垂直于观测者所在地铅垂线的平面与天球相割的大圆,也可理解为天球上与天顶、天底等距离的大圆。地平圈将天球分成两半,地平圈之上的为可见半球,之下为不可见半球。天顶、天底是地平圈的两极。天球上所有与地平圈相平行的圆都叫地平纬圈。地平纬圈由地平圈向天顶、天底逐渐缩小。

3. 四方点与上点、下点

一般情况下,天赤道和地平圈都有两个交点,即东点(E)和西点(W)(图 1-3 左),地平圈上与东点、西点等距离的两点为北点(N)和南点(S),它们是子午圈和地平圈的两个交点,其中距天北极较近的那个交点是北点,距天南极较近的是南点。上述四点合称为四方点,其排列及顺序与实际方向一致。天赤道上与东点西点等距离的有两个点,一个在地平圈之上,称为上点(用 Q 表示,也是午圈与天赤道的交点),一个在地平圈之下,称为下点(用 Q′表示,也是子圈与天赤道的交点)。

4. 黄道和黄极

前已叙及黄道是太阳周年视运动的轨迹，实际上是地球公转轨道所在平面与天球相交的大圆,这个平面就是黄道面。过天球球心且垂直于黄道面的直线称为黄轴,黄轴与天球的两个交点称为黄极,其中靠近天北极的为黄北极(用 K 表示,也有称“北黄极”),靠近天南极的为黄南极(用 K′表示,也有称“南黄极”,图 1-3 右)。我们也可以这样来定义黄道:过天球球心和黄轴相垂直的平面与天球相割的大圆。它也是地球公转轨道在天球上的投影。所有过黄北极与黄南极的大圆都叫黄经圈。而天球上所有与黄道相平行的圆都叫黄纬圈,黄纬圈由黄道向黄南极、黄北极逐渐缩小。

5. 二分点和二至点

黄道与天赤道都是天球上的大圆,且不在同一平面上,因而有一定夹角,这个夹角称为黄赤交角,用 ε 表示,它是一个变量,现在使用的值是 23°26′21″.448;黄道和天赤道在天球上也就有两个交点,即春分点(♈)和秋分点(♎)(图 1-3 右)，前者是太阳周年视运动由天赤道以南运行到天赤道以北所经过的那一点，后者是太阳周年视运动由天赤道以北运行到天赤道以南所经过的那一点。黄道上与春分点、秋分点等距离的两个点,即夏至点(♋)和冬至点(♑),位于天赤道

以北、在黄道上最北点的是夏至点，位于天赤道以南、在黄道上最南点的是冬至点。太阳在每年的 3 月 21 日、6 月 22 日、9 月 23 日和 12 月 22 日前后依次经过春分点、夏至点、秋分点和冬至点，因此，太阳经过这四点的日期分别称为春分日、夏至日、秋分日和冬至日。

6. 地平经圈和子午圈、卯酉圈

所有通过天顶、天底的大圆都称为地平经圈，简称平经圈。过天北极和天南极的地平经圈称为子午圈，它经过南点和北点，必要时以天顶、天底为界分成两部分，南点所在的部分为午圈，北点所在部分为子圈。与子午圈相垂直的地平经圈称为卯酉圈，它不仅过天顶和天底，也过东点和西点，同样，必要时以天顶、天底为界分成两部分，东点所在的部分为卯圈，西点所在部分为酉圈。

7. 时圈、六时圈和赤纬圈

所有经过天北极和天南极的大圆都叫赤经圈或时圈同时又过东点和西点的时圈称为六时圈；而过春分点的时圈叫春分圈；天球上与天赤道平行的圆称为赤纬圈，赤纬圈由天赤道到天极逐渐减小。

三、天球坐标系

和地球上的地点可以用地理坐标来表示一样，天体在天球上的视位置也可以用天球坐标来表示。天球坐标系中最基本的是基圈——球面坐标的“纬度”起算圈、始圈——球面坐标的“经度”起算圈及原点——基圈和始圈的交点，常用的天球坐标系有以下几种。

1. 地平坐标系

地平坐标系的基圈、始圈和原点分别是地平圈、午圈和南点，它的两个参量是高度(h)和方位(A)。其中高度亦称地平纬度，是天体相对于地平圈的方向和角距离，是天体和天球中心的连线与地平面的夹角，显然是线面角，高度从地平圈开始，沿天体所在地平经圈分别向天顶、天底方向度量，各 0°～90°(图 1-4)，地平圈以上为正，以下为负。高度与天顶距 (Z_0) 互余，即 $Z_0=90°-h$。方位亦称地平经度，是天体相对于午圈的方向和角距离，从午圈经过的南点开始，沿地平圈按顺时针方向(即向西)度量，自 0°到 360°。南点、西点、北点和东点的方位分别是 0°、90°、180°和 270°。天体的方位也就是该天体所在地平经圈所在的平面与午圈所在平面的夹角。天体通过观测者子午圈时叫中天，天体每天

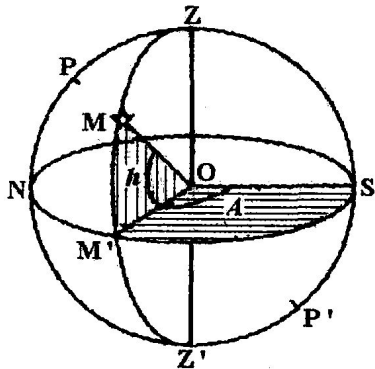



图 1-4 地平坐标系

有一次上中天，一次下中天。一般情况下，天体通过子午圈且高度最大时叫上中天，通过子午圈且高度最小时叫下中天；特殊情况下，如观测者位于地球两极时，天体没有所谓上中天和下中天的区别。

地平坐标系常用于航海、航空及大地测量等部门，在卫星定位系统(GPS)出现之前，它的"高度"应用之一是测北极星高度定地理纬度。知道北极星在天北极附近，如图 1-5，∠P′为北极星高度，故 φ=P′。这就是仰极（地平圈以上的天极）的高度等于当地的地理纬度。地平坐标的"高度"应用之二是描述一天中太阳高度的变化及一年中正午太阳高度的变化。

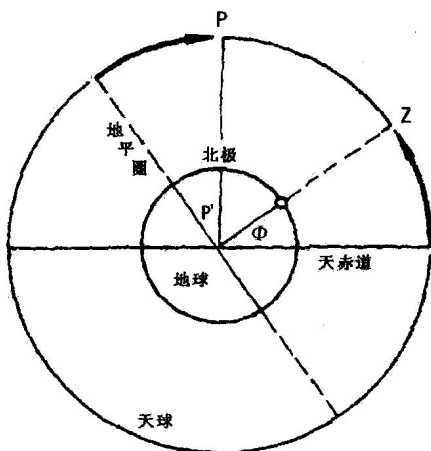



图 1-5 仰极高度等于当地地理纬度

2. 第一赤道坐标系

第一赤道坐标系的基圈、始圈和原点分别是天赤道、午圈和上点，它的两个参量是赤纬(δ)和时角(t)。其中赤纬是天体相对于天赤道的方向和角距离，亦即天体和天球球心的连线与天赤道面的夹角，这是一个线面角，它从天赤道开始，沿天体所在赤经圈分别向天北极和天南极方向度量，自 0°～90°，向天北极方向为正，向天南极方向为负（图 1-6)。赤纬的余角称为极距(p)，它是天体和天球球心的连线与仰极之间的夹角。时角则是天体所在的时圈相对于午圈的方向和角距离，从午圈经过的上点开始，在天赤道上向西度量，自 0^h～24^h，一周 360°合 24^h，故 15°为 1^h，15′为 1^m，15″为 1^s，因而第一赤道坐标系又叫时角坐标系，上点、

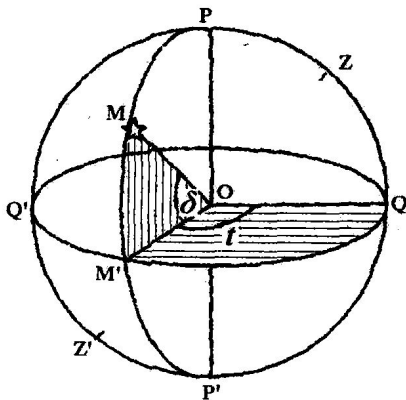



图 1-6 第一赤道坐标系

西点、下点、东点的时角分别 0^h、6^h、12^h 和 18^h。

第一赤道坐标系主要用于时间的度量。

3. 第二赤道坐标系

第二赤道坐标系的基圈、始圈和原点分别是天赤道、春分圈和春分点，它的两个参量是赤纬(δ)和赤经(α)。赤纬与第一赤道坐标系完全相同;赤经是天体所在时圈相对于春分点的方向和角距离，从春分点开始在天赤道上向东度量，自 $0^h \sim 24^h$(图 1–7)。

第二赤道坐标系主要用于编制星表。

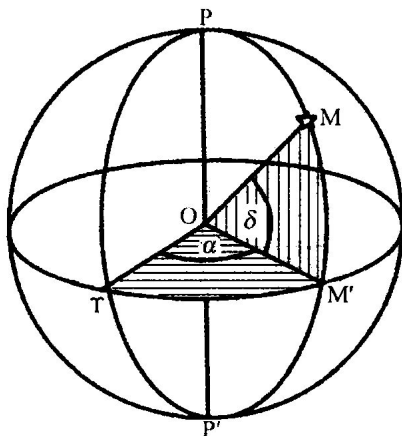



图 1–7 第二赤道坐标系

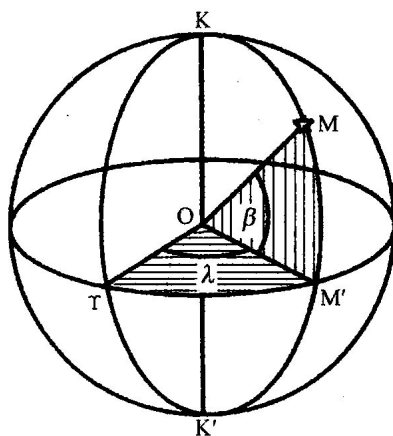



图 1–8 黄道坐标系

4. 黄道坐标系

黄道坐标系的基圈、始圈和原点分别是黄道、过春分点的黄经圈和春分点，它的两个参量是黄纬(β)和黄经(λ)。黄纬是天体相对于黄道的方向和角距离，亦即天体和天球球心的连线与黄道面的夹角，这也是一个线面角，黄纬从黄道开始，沿天体所在黄经圈分别向黄北极和黄南极度量，自 0° ~ 90°，向黄北极方向为正，向黄南极方向为负(图 1–8)。黄经是天体所在黄经圈相对于春分点所在黄经圈的方向和角距离，从春分点开始在黄道上向东度量，自 0° ~ 360°。虽然其它天体都各有自己的黄纬和黄经，但太阳的黄纬是固定的，都为 0°(因为太阳在黄道上运行)。太阳的黄经，每天增加 59′，它过春分点、夏至点、秋分点和冬至点时的黄经分别为 0°、90°、180°和 270°。

黄道坐标主要用于表示太阳系成员在星空间的视位置和视运动。

5. 银道坐标系

银河系有一个银道面(将在第五章介绍)，银道面与天球相交的大圆叫银道，过天球球心垂直于银道面的直线与天球的两个交点叫银极，其中与天北极接近

的叫北银极,与天南极接近的叫南银极。所有经过银极的大圆都叫银经圈,而天球上所有与银道相平行的圆都叫银纬圈。银道与天赤道有两个交点(两者交角为63°26′),其中银道由天赤道之南进入天赤道以北的交点叫升交点。

银道坐标系的基圈、始圈和原点分别是银道,过升交点的银经圈和升交点,它的两个参量是银纬(b)和银经(L),银纬是天体相对于银道的方向和角距离,从银道开始,沿银经圈分别向北银极和南银极方向度量,自0°~90°,向北银极方向为正,向南银极方向为负;银经是天体相对于过升交点的银经圈的方向和角距离,从升交点开始,沿银道向东度量,自0°~360°。

银道坐标系主要用于对银河系的研究。

四、主要天球坐标系的区别和联系

不同天球坐标系有不同的基圈、始圈和原点,用途也各有差异,但它们之间相互也有一定的联系。

1. 地平坐标系与第一赤道坐标系

地平坐标系的方位和第一赤道坐标系的时角都从午圈开始向西度量,但起点不同,前者是南点,后者是上点。另外高度和赤纬起算的基本圈也不同;但是它们之间也有一定的联系,由图1-9可知,仰极(P)高度所对圆心角等于天顶(Z)的赤纬所对圆心角,同时还等于当地的地理纬度。

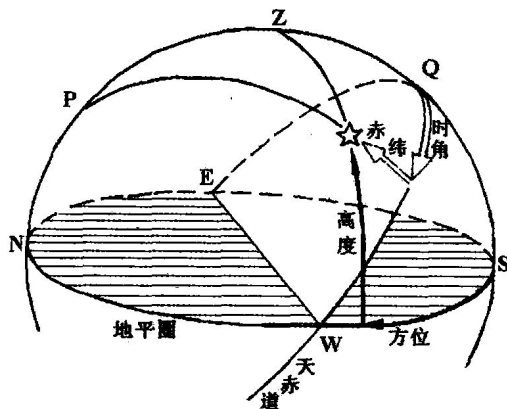



图1-9 地平坐标系与第一赤道坐标系

2. 第二赤道坐标系与黄道坐标系

第二赤道坐标系的赤经和黄道坐标系的黄经都从春分点开始向东度量,但前者在天赤道上向东度量,后者在黄道上向东度量(图1-10),另外前者的赤纬和后者黄纬起算的基圈不同。但是它们之间也有一定的联系,由于黄道和天赤道有23°26′的夹角,因此根据球面三角形,利用天体的已知条件如赤纬、赤经可求

其黄纬、黄经,或由已知的黄纬、黄经可求其赤纬、赤经。如果这个天体是太阳,则随着其黄经的增加,其赤纬变化于 ± 23°26′之间。

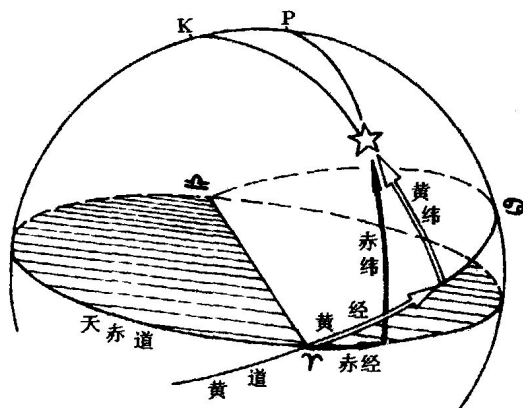



图 1-10 第二赤道坐标系与黄道坐标系

3. 第一赤道坐标系与第二赤道坐标系

两种坐标系具有相同的赤纬,且时角和赤经都在天赤道上度量;时角以午圈为始圈,自上点向西度量,而赤经以春分圈为始圈,自春分点向东度量。关于它们之间的联系,我们引入恒星时(S)这一概念,它被定义为春分点的时角,即 $S = t_r$,我们还知道春分点的赤经为 0^h,因此很容易证明:恒星时(S)与任一天体的赤经和时角的关系为:$S = t_s + \alpha_s$(图 1-11)。当恒星中天时,$t_s = 0^h$,上式简化为 $S = \alpha$,亦即,任何时刻的恒星时等于当时中天恒星的赤经(即上点的赤经),也等于春分点的时角。

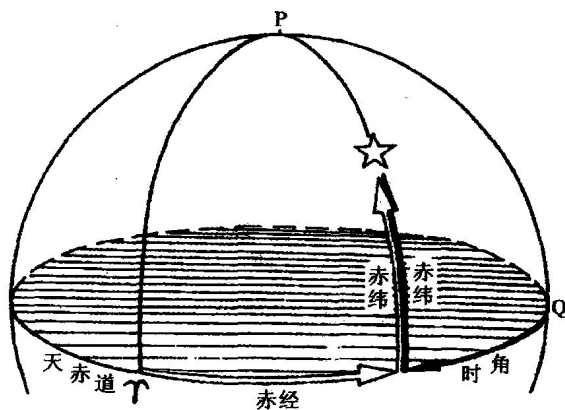



图 1-11 第一赤道坐标系与第二赤道坐标系

各种天球坐标系比较如表 1-1。

表 1-1 天球坐标系比较

坐标系	地平坐标系	第一赤道坐标系	第二赤道坐标系	黄道坐标系
天球轴	当地垂线	天轴	天轴	黄轴
两极	天顶、天底	北天极、南天极	北天极、南天极	北黄极、南黄极
纬圈	地平纬圈(等高线)	赤纬圈	赤纬圈	黄纬圈
基圈	地平圈(有四方点)	天赤道(有上、下点)	天赤道(有二分点)	黄道(有二分、二至点)
经圈(辅圈)	地平经圈(有子午、卯酉圈)	时圈(有子午圈、六时圈)	时圈(有二分、二至圈)	黄经圈(有二至圈)
始圈	午圈	午圈	春分圈	通过春分点的黄经圈
原点	南点	上点	春分点	春分点
纬度	高度	赤纬	赤纬	黄纬
经度	方位(向西度量)	时角(向西度量)	赤经(向东度量)	黄经(向东度量)
应用	广泛应用天文航海、天文航空、人造地球卫星观测及大地测量等部门	广泛应用于天体测量,观测恒星、星云、星团等类型的遥远天体		观测太阳以及太阳系内运行在黄道面附近的天体

第二节 天体的视运动与四季星空

无论是太阳还是夜晚的星星或月亮,每天都有自东向西(即东升西落)的运动;另外随着日期或季节的变化,夜晚所见的星空也在不断的变化,原因何在?这是本节所讨论的内容。

一、天体的周日视运动

所谓天体的周日视运动是指所有天体以一天为周期的自东向西运动。这种运动实质是地球自转的反映。由于地球自转方向是自西向东的,在把地球看作是不动的情况下,天体就会呈现出上述的视运动。天体周日视运动的轨迹叫做周日平行圈,简称周日圈,即各自所在的赤纬圈,都以南北天极为不动的中心。不同天体的周日圈是不同的,但它们都是与天赤道平行的圆,或者说是以天极为圆心的同心圆,天体赤纬绝对值愈大,周日圈愈小,反之愈大。位于赤道上的恒星,周日圈最大,而位于天北极和天南极上的恒星,其周日圈缩为一点(图 1-12)。太阳、月球和行星与

图 1-12 天极附近天体的周日视运动

恒星不同,除了有周日运动外,还有它自身的巡天运动,即自西向东的运动。

天体周日运动的方向应同地球自转方向相反,即自东向西。天体周日运动的周期和速度,如实反映了地球自转的周期和角速度。

另外,我们在地球上不同的纬度所见到的周日运动也不相同:在 90°N 处,天顶与天北极重合,地平圈与天赤道重合,因此地平圈以下(即天赤道以南)的天体永远不可见,称为恒隐星;地平圈以上(即天赤道以北)的天体始终是可见的,称为恒显星,因而没有东升西落的出没星,所能见到的各天体的周日视运动的高度不变,周日圈与地平圈平行(图 1-13 左)。如果这个天体是太阳,当太阳 $\delta>0°$ 时,即从春分到夏至到秋分这段时间,我们所见到的是极昼现象。在 0°处(即赤道上),所有天体都是出没星,既没有恒显星,也没有恒隐星,周日圈与地平圈相垂直,如果这个天体是太阳,太阳在地平以上和在地平以下的时间等长,亦即昼夜等长(图 1-13 中)。在 $0°<\phi<90°$处,天体的周日圈与地平圈既不平行,也不垂直,而是斜交,交角等于当地的余纬,显然纬度越高,交角越小,反之越大(图 1-13 右)。因此,既有恒显星(区)、恒隐星(区),也有出没星(区),恒显星与出没星之间的恒显圈(恒显星区的界线,对北半球即在北点与地平圈相切的赤纬圈)的赤纬与当地纬度互余,恒隐星与出没星之间的恒隐圈(恒隐星区的界线,对北半球即在南点与地平圈相切的赤纬圈)的赤纬与恒显圈赤纬数相同,符号相反。显然纬度越低恒显(隐)星区越小,出没星区愈大;反之恒显(隐)星区越大,出没星区愈小。

左:北极点上　　中:赤道上　　右:北极和赤道之间

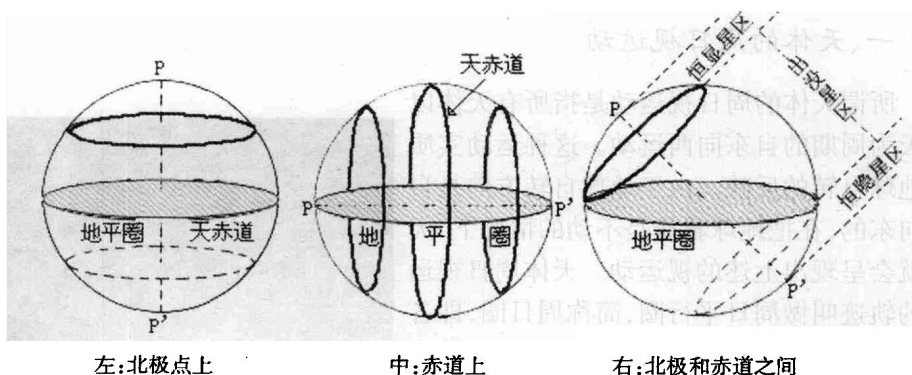



图 1-13 不同纬度的天体周日视运动

二、太阳的周年视运动

太阳的周年视运动是指因地球公转而引起的太阳在恒星背景上的运动,它不像天体(含太阳)的周日视运动那样明显和直观,但在夜晚,你稍稍注意星空便可发现,在一年中的不同季节,星空是不一样的(图 1-14),这从侧面反映了太阳

在以恒星为背景的星空间的运动，其运动的轨迹为黄道。

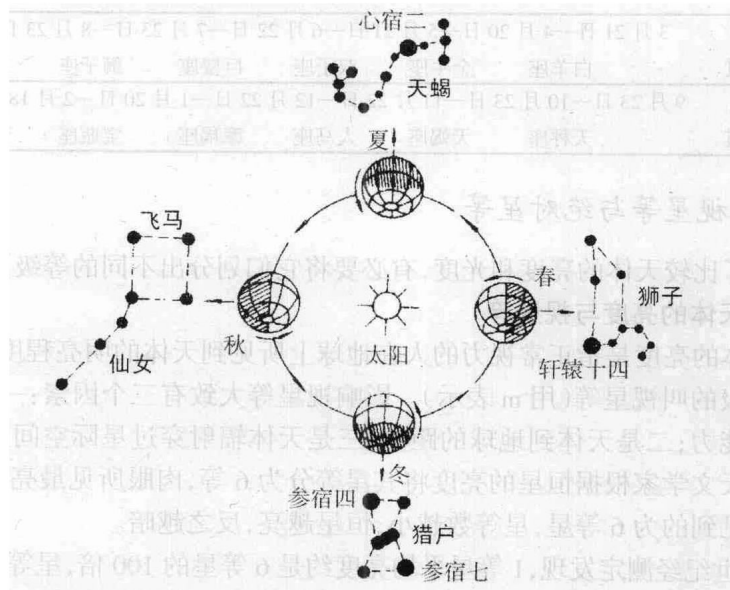



图 1-14 不同季节星空的变化

在黄道附近分布有十二个星座被叫做黄道十二宫，视太阳在十二宫运行的时间见表 1-2 和图 1-15。由于黄道和天赤道有 23°26′的夹角，因此太阳的周年视运动表现为半年时间（自春分日经夏至日到秋分日）太阳赤纬大于零，太阳直射点（太阳中心与地球中心连线和地球表面的交点）位于北半球，半年时间（自秋分日经冬至日到春分日）太阳赤纬小于零，太阳直射点位于南半球。

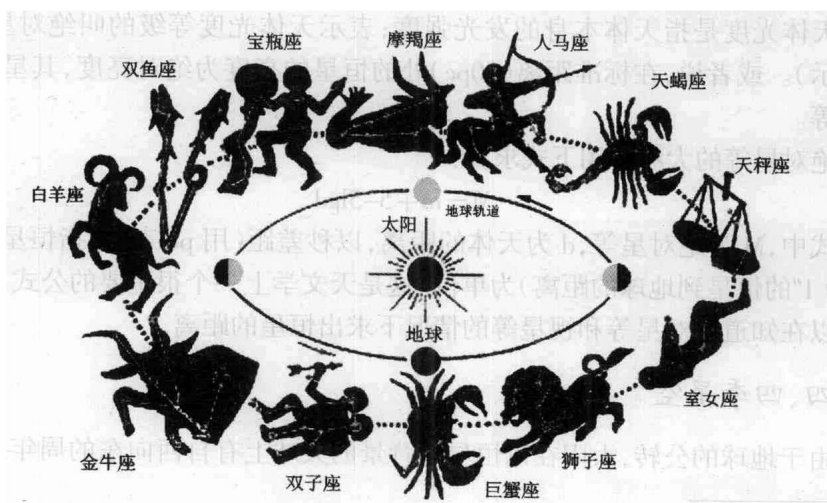



图 1-15 黄道十二宫

表 1-2 视太阳在黄道十二宫中运行的时间

日　期	3月21日—4月20日	4月20日—5月21日	5月21日—6月22日	6月22日—7月23日	7月23日—8月23日	8月23日—9月23日
太阳经过	白羊座	金牛座	双子座	巨蟹座	狮子座	室女座
日　期	9月23日—10月23日	10月23日—11月22日	11月22日—12月22日	12月22日—1月20日	1月20日—2月18日	2月18日—3月21日
太阳经过	天秤座	天蝎座	人马座	摩羯座	宝瓶座	双鱼座

三、视星等与绝对星等

为了比较天体的亮度和光度,有必要将它们划分出不同的等级。

1. 天体的亮度与视星等

天体的亮度是指正常视力的人在地球上所见到天体的明亮程度；表示天体亮度等级的叫视星等(用 m 表示)。影响视星等大致有三个因素:一是天体本身的发光能力;二是天体到地球的距离;三是天体辐射穿过星际空间的环境状况。古希腊天文学家根据恒星的亮度将其星等分为 6 等,肉眼所见最亮的为 1 等星,刚好能见到的为 6 等星,星等数越小,恒星越亮,反之越暗。

19 世纪经测定发现,1 等星平均亮度约是 6 等星的 100 倍,星等相差 1 等,亮度差 $\sqrt[5]{100}=2.512$ 倍。根据这一关系,可以把视星等向两端延伸。如满月、太阳的视星等分别是 −12.73 等和 −26.74 等。哈勃太空望远镜可观测到 28 等的恒星。

视星等的大小可用普森公式求算:

$$m=-2.5\lg E$$

式中,m 为视星等;E 为天体的亮度,可以精确测定。

2. 天体的光度和绝对星等

天体光度是指天体本身的发光强度;表示天体光度等级的叫绝对星等(用 M 表示)。或者说,在标准距离(10pc)处的恒星的亮度为绝对亮度,其星等为绝对星等。

绝对星等的大小可用下式求算:

$$M=m+5-5\lg d$$

式中,M 为绝对星等,d 为天体的距离,以秒差距(用 pc 表示,指恒星周年视差[①]为 1″的恒星到地球的距离)为单位。这是天文学上一个很重要的公式,因为我们可以在知道绝对星等和视星等的情况下求出恒星的距离。

四、四季星空

由于地球的公转,太阳在以恒星为背景的天球上有自西向东的周年运动,从

① 恒星与地球的连线和地球轨道半径相垂直时,地球轨道半径对恒星的张角叫恒星周年视差。

而导致一年四季所见到的星空的不同(图 1-14)。

1. 星空区划和星空命名

很早,人类就对星空给予关注,并且为了便于认识星空,识别星体,将星空上肉眼看到的恒星,按照它们排列的形状,分为若干区域即星座。经过长时间演变,1922 年国际天文学会确定全天共 88 个星座(见附录"88 星座表"),星座内的恒星用希腊字母和数字命名。

这些星座分布在天赤道以北的有 29 个,分布在天赤道以南的有 47 个,横跨黄道两侧的 12 个(即前述黄道十二宫,图 1-15)。

关于星座的名称,绝大多数沿用过去的名称。88 个星座名称大致可分三类:一类是用神话人物的名字命名,共 22 个;一类是用仪器用具的名称命名,共 22 个;一类是用动物的名称命名,共 44 个。

星座内恒星的命名一般采用星座名称加希腊字母或数字构成,如大熊座 α 星,大熊座 80 星。星座内恒星依从亮到暗的顺序与希腊字母顺序一一对应命名(少数星座如双子座等除外),亮度排序在 25 及之后的恒星按其赤经依次以数字命名。

2. 四季星空

太阳视位置所在星座及其附近的星区只在白天出现,在太阳强烈光辉下,我们无法看到,但是我们可以在与太阳相反的方向上看到夜晚星空;由于地球自西向东绕太阳公转,太阳视位置在一年中自西向东依次经过黄道 12 个星座,我们也就能够在一年中依次看到与太阳视位置所在星座的赤经相差 180°附近星区的星座。这就是四季星空变化的原因。

我们的祖先早就注意到四季星空的变化,有谚语为证"斗柄东指天下皆春,斗柄南指天下皆夏;斗柄西指天下皆秋;斗柄北指天下皆冬"。

四季星空的主要星座见附录"四季星图"。

第三节　天文望远镜和空间探测器

天体离我们都很遥远,因此我们对天体信息的获得主要还是从天体辐射光谱着手(图 1-16)。光谱是辐射能随波长的分布,从下面的波长图可知,天体辐射波长范围很宽,从 10^{8}cm 到 10^{-12}cm,从较短波段到较长波段分别是 γ 射线(图上未标出)、X 射线、紫外线、可见光(波长在 0.4μm ~ 0.76μm,被称为光学窗口)、红外线(波长在 0.7μm ~ 1cm,被称为红外窗口)、射电波(其中有较宽的射电窗口)等。

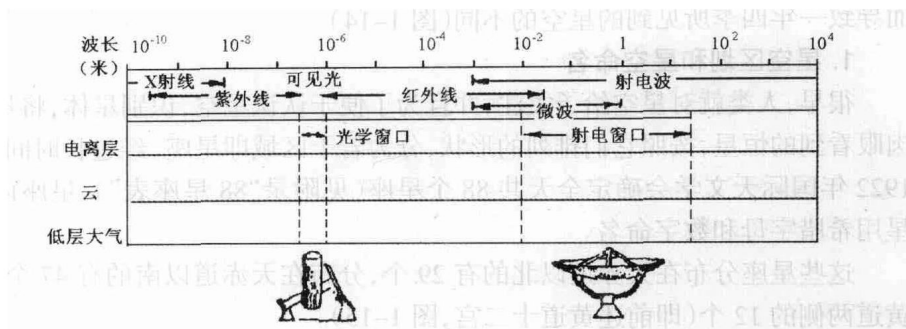



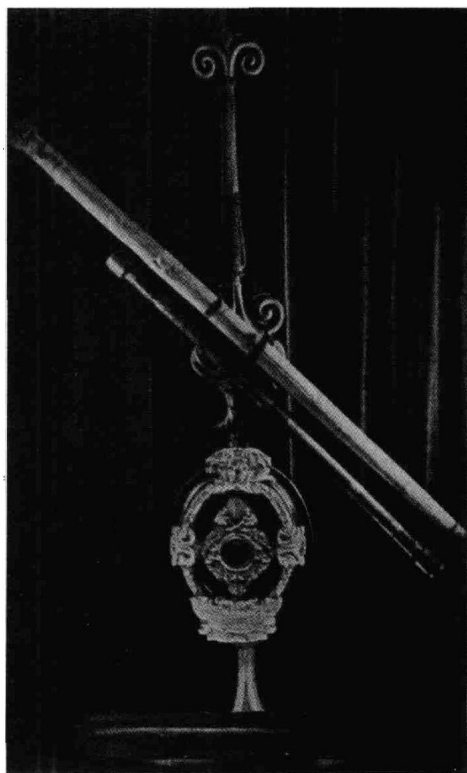
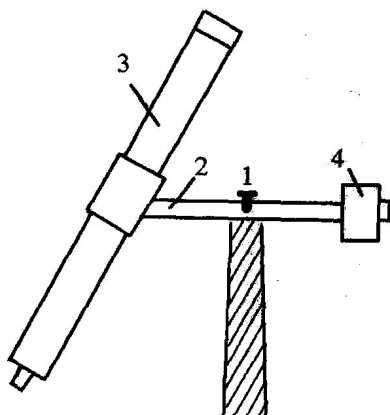
图 1-16 波长图

如果我们要了解天体全波段信息，就必须采取不同的工具或手段，如光学望远镜、射电望远镜、空间望远镜和空间探测器等来获得天体上述各不同波段的信息。

一、光学望远镜

望远镜是观测远处物体的仪器。它有两个作用：一是放大远处物体的张角，使人眼能看清角距更小的细节；二是可以收集到更多的光，使观测者能看到原来看不到的暗弱物体。1609 年伽利略发明世界上首架天文望远镜（图 1-17）以来的近 400 年，望远镜制造技术得到了极大发展，苏联制作了世界最大的单体光学望远镜。目前世界上已有数架口径达 10m 以上的光学望远镜。

图 1-17 世界上首架天文望远镜——伽利略望远镜

光学望远镜只用于对天体辐射中可见光部分的观测。按轴系装置可分两种：一是地平式装置（图 1-18），它与地平坐标系相对应，具有垂直轴和水平轴。当望远镜绕前者转动时，其方位角在连续变化，而高度角不变；绕后者转动时，其方位角不变，而高

度在连续变化。二是赤道式装置(图 1-19),它与赤道坐标系相对应,具有极轴(又称赤经轴,指向天极)和赤纬轴。望远镜绕极轴转动时,其赤经(或时角)在连续变化,而赤纬保持不变;绕赤纬轴转动时,赤纬连续变化,而赤经(或时角)保持不变。

1. 竖直轴 2. 水平轴 3. 望远镜 4. 平衡锤

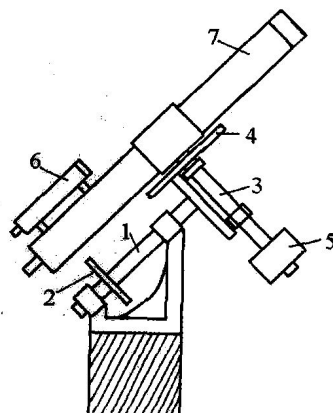



图 1-18 地平式装置示意图

1. 极轴 2. 时盘 3. 赤纬轴 4. 赤纬盘 5.平衡锤 6.寻星镜 7.望远镜

图 1-19 赤道式装置示意图

按光学系统可分折射望远镜,反射望远镜和折反射望远镜三种。

1. 折射望远镜

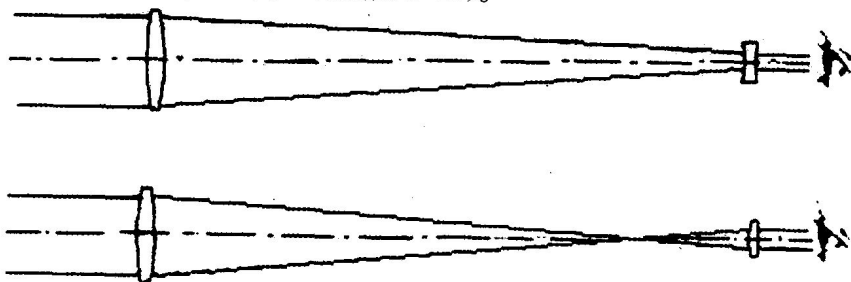
折射望远镜物镜为凸透镜,主要起聚光作用。根据目镜的不同又可分为伽利略式(目镜为凹透镜)和开普勒式(目镜为凸透镜)。前者成正像,后者成倒像(图 1-20)。折射望远镜成像质量好,焦距长,照相底片比例尺大,因而适合于测定恒星的位置、运动以及作为导星系统。它的缺点是,有残余色差,玻璃对紫外光吸收严重,制造难度大因而相对口径小。目前,最大的折射望远镜是美国叶凯士天文台的 1.02m 望远镜,焦距为 19.4m(图 1-21)。

上:伽利略式 下:开普勒式

图 1-20 折射望远镜的光学系统

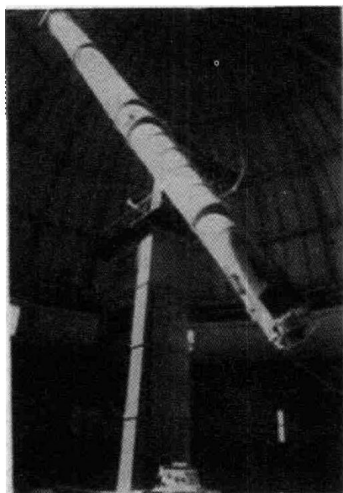



图 1-21 世界上最大的折射望远镜

2. 反射望远镜

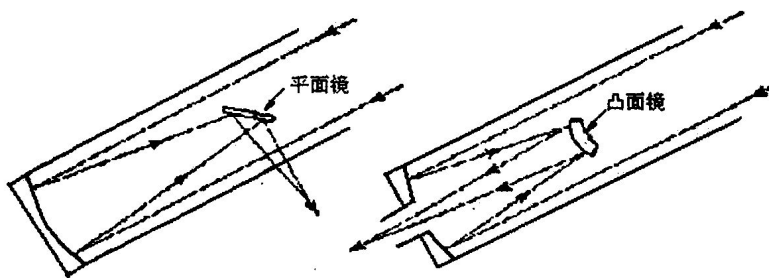
反射望远镜物镜为抛物面或双曲面反射镜，同样也是起聚光作用。根据副镜不同又可分为牛顿式和卡塞格林式，前者主镜为抛物面，副镜为与光轴成 45°角的平面反射镜，成倒像，目镜在镜筒侧边（图 1-22 左）。后者主镜为抛物面或凸双曲面，副镜为双曲面反射镜，成倒像，物镜中心有一小孔，在小孔后面安装目镜以便观测（图 1-22 右）。反射望远镜完全没有色差，制造难度相对小些，因而可制作大口径望远镜，甚至可采用多镜面拼镶技术制作出直径 10m 以上的望远镜。我国已建成的最大反射望远镜 2.4m。反射望远镜的缺点主要有：视场小，副镜挡光，减少接收到的辐射，物镜镀的银或铝易氧化等。

左：牛顿式　　　　　　右：卡塞格林式

图 1-22 反射望远镜的光学系统

3. 折反射望远镜

折反射望远镜的物镜用透镜（改正镜）和球面反射镜组合而成。根据物镜匹配不同，可分为马克苏托夫式和施密特式，前者主镜为球面反射镜，改正镜为弯月透

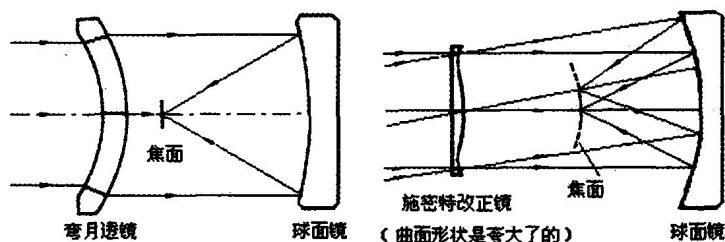
镜；后者主镜为球面反射镜，改正镜为非球面镜，以消除球面反射镜的像差（图1-23)。折反射望远镜的优点是:视场大(可达十几平方度)、光力强、像差小、成像优。

左:马克苏托夫式　　右:施密特式

图 1-23 折反射望远镜的光学系统

4. 天文望远镜的光学性能

口径(D):指望远镜物镜的有效口径,即起到集光作用部分的直径。望远镜的口径愈大,聚集的天体的光越多,可看见天体的星等数愈大,即可以观测到更暗弱的天体。这是天文学家追求大口径望远镜的主要原因。

相对口径(A):相对口径也叫光力,即口径和焦距(F)之比,A=D/F。相对口径越大,观测有视面天体越有利,因为观测到天体的亮度与 A^2 成正比。如观测太阳、月球、行星、彗星、星系、星云等,就需要相对口径大的望远镜。

分辨角(δ):分辨角指望远镜刚刚能分辨开天球上两个发光点的角距,其倒数为分辨率,它反映望远镜的分辨本领,是望远镜很重要的性能指标,分辨角小,望远镜的分辨率高。由于光的衍射,分辨角由下式确定:

$$\delta = 1.22\lambda/D$$

式中,D 为望远镜有效口径,λ 为入射光波长，都以毫米为单位,δ 以角秒为单位。分辨角与入射光波长成正比,与有效口径成反比。也就是说,λ 相同时,口径越大,分辨角越小,分辨本领越强。

放大率(G)与底片比例尺(α):目视望远镜的放大率指的是,天球上两点的张角所放大的倍数,放大率等于物镜的焦距 F 与目镜的焦距 f 之比,即:

$$G=\frac{F}{f}$$

显然,放大率与物镜焦距成正比,与目镜焦距成反比。由于一架望远镜的物镜焦距是固定的,因此配备几个焦距不同的目镜,便可根据需要得到不同的放大率。

照相望远镜不需要目镜,星空现象被拍摄在照相底片上。底片比例尺是指照相望远镜在焦平面获得天体的像,像平面上 1mm 与对应天空的角直径(角秒)的比率。

视场(ω):视场是指用望远镜观测星空时,成像良好天区的角直径。视场与放大率成反比,即放大率越大,视场越小。一般来说,折射望远镜视场最大,反射

望远镜视场最小，折反射望镜视场因物镜类型而异。

贯穿本领：指通过望远镜能看见的最暗弱恒星的星等，也叫极限星等。望远镜口径越大，就能观测到越暗弱的天体。5cm 口径望远镜可观测到 10 等星，2.16m 口径可观测到 18.7 等星，而 5m 口径可观测到 21 等星。

二、射电望远镜

光学望远镜只能获得天体可见光波段的部分信息，对其它波段的信息却无能为力。因此要更多获得天体的其它信息，就需要使用其它的方法和手段。射电望远镜就是用来进行天体辐射中射电波段的观测。射电望远镜创制于 20 世纪 30 年代，它的出现大大拓展了传统天文学研究的范围，是天文学发展史上一个重要的里程碑，20 世纪 60 年代天文学上的四大发现（类星体、脉冲星、微波背景辐射和星际有机分子）主要都是由射电望远镜观测发现的。随着射电望远镜的出现，天文学的一个重要分支——射电天文学也应运而生。

射电望远镜一般由天线系统、接收系统、记录系统及数据处理和显示系统四部分所构成。

天线系统大多为抛物面形，对于米波或分米波观测用金属网作镜面，对于厘米波和毫米波观测则用光滑的金属板作镜面。天线系统的作用是收集来自天体的射电波段信息，相当于光学望远镜的物镜，因此天线直径的大小决定收集到天体信息的多少。目前世界上最大的可跟踪射电望远镜天线位于德国波恩的马克斯·普朗克射电天文研究所，口径 100m（图 1–24）；最大固定式射电望远镜天线位于波多黎各的美国阿雷西博一个天然小盆地中，口径为 366m（图 1–25），我国拟在贵州某地建造 500m 口径的固定球面射电望远镜。

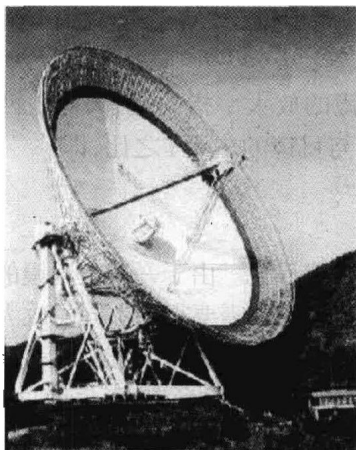



图 1–24 世界上最大的可跟踪射电望远镜

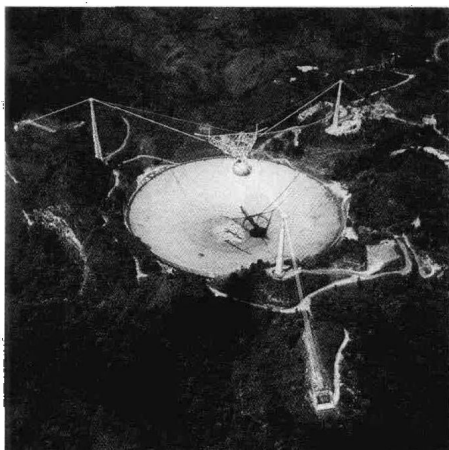



图 1–25 世界上最大的固定式射电望远镜

接收系统的主要设备是一台接收机。来自抛物面轴向的射电波被反射集中到位于抛物面焦点的“照明器”上,在这里信号功率首先被放大10—1 000倍,并变换成较低频率(中频),然后传送到接收机,接收机是射电望远镜的重要组成部分,它的作用是把来自天线的较微弱的信号再行放大。

记录系统是使用记录仪或电表将经过接收机放大的信号记录下来,并传送给数据处理和显示系统(计算机系统)。

为了提高射电望远镜的分辨本领,除增大天线口径外,还可应用射电干涉技术设计射电干涉仪,它是由多元天线组成的一种射电望远镜,可以大幅度提高分辨本领。最简单的干涉仪由两台相隔一定距离的天线构成,干涉仪的分辨率取决于两天线之间的距离,但距离太远会出现连接线过长带来的问题,于是又研制出甚长基线干涉仪(VLBI),其特点是干涉仪的两端完全独立,不需要连接线。因而两架天线可以相隔任意距离,可使分辨率得到极大提高。后来又有了多天线干涉。20世纪50年代发展起来的综合孔径射电望远镜,是一种分辨率和灵敏度都很高、能够得到高分辨率的射电图像、适合于观测不变的射电源的设备。综合孔径射电望远镜的工作原理是:任何一幅图像都可以分解成许多亮度的正弦和余弦分布;反之,如果已知这些正弦和余弦分布,就可以合成原来的图像。从而解决了射电望远镜不能直接成像问题。

三、空间望远镜与空间探测器

地球大气层是天文观测的一个严重障碍,“过滤”和“减弱”了天体的信息。因此,在空间对天体进行观测成为现代天文学的新方向。

1. 空间望远镜

哈勃望远镜。哈勃望远镜历时13年研制,耗资21亿美元,于1990年4月25日由“发现号”航天飞机送入离地面614km的圆形轨道。该镜系卡塞格林式反射望远镜,有效口径2.4m,另有两个太阳能电池板,重11.5吨。由于磨制过程出现的错误,检验镜放错了1.3mm位置,使它首次发回的天体图像十分模糊。为此,1993年12月2日7名宇航员乘“奋进”号航天飞机对其进行维修,修理费2.5亿美元。修复后的哈勃望远镜发回十分清晰的天体照片,并获得众多在地球上无法观测到的结果,为人类探测宇宙发挥了重要作用。

依巴谷天体测量卫星。依巴谷是“HIPPARCOS”的音译,是“高精度视差收集卫星”的缩写,是地球同步卫星,欧洲空间局1989年发射。它的分辨角达0.002",它测量了500S差距范围内10万余颗恒星的距离。

1992年2月美国和日本发射的卫星一甚长基线干涉空间天文台计划(VOSP),在空间展成8m的射电望远镜,并实施对天体的观测。

2. 空间探测器

空间探测器分如下几类。一是恒星、星系和星云探测系列:此类探测主要使用地球卫星轨道器,既包含前述的哈勃望远镜和依巴谷卫星,也包含用于观测天体紫外波段、红外波段、X 射线、γ 射线等的探测器,此类探测器已达数十个。二是月球探测系列:主要包括苏联“月球号”系列等,美国的“徘徊者”系列、“勘测者”系列、“月球轨道环行器”系列和“阿波罗”系列(后者将 12 名宇航员送上月球并顺利返回)等(见表 2-2),欧盟的“SMART”系列,日本的“月亮女神”系列和中国的“嫦娥”系列。三是太阳探测系列:此类探测器主要用于对太阳进行探测,20 世纪后半叶,美国、原苏联、德国先后共发射数颗此类探测器。四是行星探测系列:主要包括美国的“水手”系列、“先驱者”系列、“海盗号”系列、“旅行者”系列、原苏联的“金星”系列、“火星”系列、“火卫飞船”系列等。它们对八大行星或登陆探测或近距离探测,获得许多令人鼓舞的成果。

第四节　天文观测时间系统

天体的运动和演化都是在时间和空间中进行的,因此,时间系统的建立是天文观测和研究的需要。天文观测时间系统建立的主要依据是地球的自转、地球绕太阳的公转和月球绕地球的公转。

一、恒星日和恒星时

地球是自转的,地球自转的周期笼统地说是一日,但是由于参考点的不同,就有不同的“日”,日的长度也就不同。若以某一恒星(或春分点)为参考点,来度量地球自转周期,则该恒星(或春分点)连续两次在同一地点上中天的时间间隔就是恒星日,时长 24 恒星时。以春分点在该地上中天的瞬间作为恒星时的起算点,即以春分点的时角来计量恒星时:$S=t_r$。恒星时在日常生活中不大用,但天文测量工作离不开它。

二、太阳日和太阳时

地球自转周期若以太阳为参考点,则太阳中心连续两次在同一地点上中天的时间间隔,即为太阳日。太阳日有真太阳日(亦称视太阳日)和平太阳日之分。上述的实为真太阳日,一个真太阳日分为 24 真太阳时或视太阳时(简称视时)。由于地球公转轨道是一个椭圆,因此地球绕太阳公转速度是不均匀的,真太阳时也就不会等长,这给日常生活中的应用带来不便,因此天文学家定义一个“平太阳”:即在天赤道上匀速运动,且方向和周期与真太阳相同的假想太阳。以平太阳

为参考点即平太阳连续两次在同一地点上中天的时间间隔叫平太阳日，一个平太阳日分为 24 平太阳时(简称平时)。由于视时不均匀，平时是均匀的，一般情况下，两者之间会有差值，这个差值称为时差。即：时差 = 视时 − 平时。时差不是一个固定值，其大小随真太阳与平太阳的相对位置的变化而变化，当视太阳在平太阳之西，视时大于平时，时差为正；反之，当视太阳在平太阳之东，视时小于平时，时差为负。

三、地方时和世界时

地方时是指以观测者本地经度测定的时间。根据参考点不同，又分地方恒星时、地方视时和地方平时。同一物理时刻，各地的地方时均不相同，这会造成全球时间上的混乱，也不便人类交流和长距离活动中的应用。为了克服这种不便，国际上统一规定了全球可以通用的时间标准——世界时(用 UT 表示)：即本初子午线处的地方时。应用世界时后，全球时间十分有序，若本初子午线处的地方时(即世界时)为 UT，则其它地点(如 A 点)的世界时 $T_A = UT + \lambda_A/15°$(小时，λ_A 为地点 A 的经度)。

四、时区、区时和法定时

世界时虽然克服了地方时过于分散所造成的全球时间的混乱，但也存在过于统一而致各地在日常生活中使用不便。因此为了解决地方时和世界时的缺陷，1884 年国际子午线会议规定，全世界统一实行分区计时制，即把全球分若干区，称为时区，每一个区用同一个时间，称为区时。这样就解决了地方时和世界时两者所存在的问题。国际上规定，以经线为界，把全球分为 24 个时区，每区跨经度 15°，以 0°和 15°及 15°的整数倍作为时区的中央经线(或标准经线)，即中央经线等于 $n \times 15°(n=0,1,2,3,\cdots\cdots,12)$，中央经线两侧各 7.5°为同一时区。每一时区标准经线的地方平时定为该时区的区时。具体划分是：0°经线为中央经线的时区为 0 时区，在 0 时区以东的是东时区，自东一区到东十二区；0 时区以西的是西时区，自西一区到西十二区，东、西十二区共同使用 180°经线为中央经线，所用的是 180°经线的地方时(图 1-26)。这样划分之后，同一时区时间误差不超过半小时；相邻两时区，时间仅相差 1 小时。根据东早西迟原则，东边的时区比西边的时区早若干小时。上述时区划分是全球统一的，可以看作是理论时区，并没有考虑到各个国家使用时间的方便，因此，各国鉴于本国的情况，确定本国或本国不同地区内使用统一的时间，这就是现实时区或称法定时区。如我国东西跨 5 个时区，如果不同时区使用各自的区时，也会造成很多麻烦，因此我国规定，以北京(经度为 116°20′E)所在的时区(东八区，其标准经线为 120°E)作为我国统一使

用的时间，称为北京时，它比世界时早 8 小时。

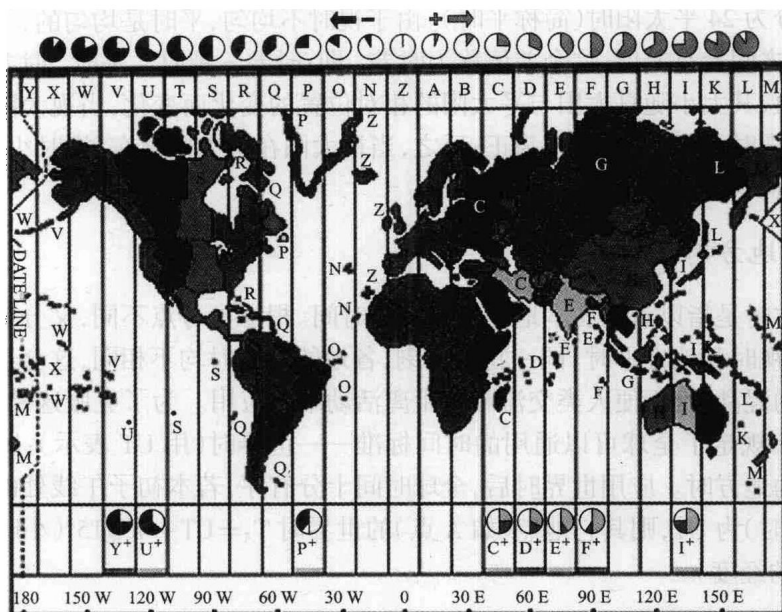



图 1-26 时区划分和国际日期变更线

五、国际日期变更线

时区和区时只能确定时间，不能确定日期。为了弥补这一不足，国际会议规定：180°经线为国际日期变更线，即日界线。之所以选定 180°经线是因为它穿过的国家很少，为了避免一个国家被日界线穿过，日界线有几处曲折(图 1-26)。由于地球自西向东自转，因此，自日界线东侧进入日界线西侧(即从西十二区进入东十二区)日期增加一天，时刻不变，与上相反方向则需减一日。

六、原子时、世界时和协调世界时

原子时(AT)是由原子内部能级跃迁所发射或吸收的极为稳定的电磁波频率所建立的时间系统。其基本单位为原子秒，即铯原子振荡 9 192 631 770 次所需的时间，原子秒的 3 600 倍即原子时，自 1967 年起使用。原子时的最大优点是秒长十分稳定，能满足对时间有高精度要求部门的需要，但时刻没有实际物理意义，不便人们工作、生活使用。

世界时(UT)是本初子午线处的地方时，即格林尼治平时，它的优点是时刻有实际物理意义，即以平太阳为参考点，能满足日常工作和生活需要，但它的缺点是秒长不固定，不能满足对时间有高精度要求部门的需要。

由于原子时和世界时各有优缺点，并且优缺点互补，因此天文学家吸取两者的优点定义了协调世界时（UTC），即原子时的秒长与世界时的时刻相互协调的时间标准。采用协调世界时后，人们的日常工作生活可以用它有实际物理意义的时刻，而对时间有高精度要求的部门可以用它的稳定秒长，因而协调世界时可满足所有部门和人群的需要。由于世界时秒长不固定，而原子时的秒长十分固定，两种时间的秒长必然有差值，因而需要“协调”，协调的方法是：当世界时与原子时差值达到 0.9 秒时，设置一个闰秒，置闰的 1 秒一般在年中或年底实施。如 2005 年 12 月 31 日最后 1 分钟为 61 秒。

七、历　法

日常生活中，人人离不开日历。日历就是对年、月、日作周密安排。推算日、月、年的时间长度和它们之间的关系，制定时间顺序的法则就是历法。

历法主要依据的是自然时间即平太阳日、朔望月、回归年。平太阳日长度为 24 平太阳时，朔望月是指连续两次朔（或望）之间的时间间隔，长度是 29.5306 日，回归年是指太阳视运动中，其中心连续两次经过春分点的时间间隔，长度是 365.2422 日。历法上的日、月、年我们称为历日、历月和历年。历月和历年只能是“日”的整数，而不能有小数，于是就存在历月与朔望月、历年与回归年的协调问题。由于协调的对象不同，就有不同的历法。

1. 阴　历

侧重协调历月和朔望月关系的历法叫太阴历，简称阴历。其基本特点是：只考虑朔望月，不考虑回归年，历月平均长度近于朔望月长度，历年长度是历月长度的 12 倍，同样是历日长度的整数倍。

阴历按朔望月长度安排大月和小月，单数月为大月，30 天，双数月为小月，29 天，这样全年历月的平均长度为 29.5 天，与朔望月差 0.0306 天，约等于 44 分 0.3 秒，每年差 8.81 小时，30 年约差 11 天，大约 45 年就要差 16 天多。因而 45 年后，月相和日期就不对应了，日历上是初一，而实际月相则是满月。协调的办法是：在 30 年里另外加 11 天给予弥补，即 30 年 11 闰，就种方法叫置闰。置闰的年叫闰年，分别安排在每 30 年中的第 2、5、7、10、13、16、18、21、24、26、29 年，置闰的年总长度为 355 天。没有置闰的年叫平年，总长度为 354 年。置闰的一天放在 12 月的最后一天，亦即 12 月为 30 天。如此安排之后，历月的平均长度为$(29.5\times12\times30+11)\div30\div12=29.530555\cdots\cdots$（日），与朔望月 29.5306 日相差甚少。

无论置闰与否，阴历历年的长度比回归年（365.2422 日）长度短 11 天左右，大约 16 年就会差半年，也就是说，某年的新年在瑞雪纷飞的冬天，大约 17 年后，新年就应该在赤日炎炎的夏天了，因此这种历法没有季节意义，不仅无法指导农

业生产，对日常生活也很不便。由于宗教上的原因，这种历法只在信奉伊斯兰教的国家和地区使用。回历中的太阴历就是这种历法。

2. 阳　历

侧重协调历年和回归年关系的历法叫太阳历，简称阳历。其基本特点是：只考虑回归年，不考虑朔望月，历日与月相无对应关系，历年是历月的12倍，同样是历日的整数倍。

现行阳历亦称格里高利历或简称格里历，是罗马教皇格里高利十三世于1582年颁布实行的。它规定：1、3、5、7、8、10、12共7个月为大月，每月31天，4、6、9、11共4个月为小月，每月30天，2月在平年为28天。同时还规定每四年一闰，闰年的2月为29天。一般能被4整除的公元年份为闰年，但逢百之年即世纪之年需能被400整除才是闰年。

为何如此置闰？回归年长度为365.2422日，是有小数的，而历年只能是整数，平年12个月的总日数为365天，比回归年短0.2422日，协调的办法就是置闰。大约4年短0.9688日，接近一天，因此四年需加上一天，400年加100天，这就是置闰，加的一天放在2月份的最后一天，有置闰的年份为闰年，闰年总长度为366天。但是，四年只应加0.9688日，加一天显然多加了0.0312日，累积400年便多加了3.12天，因此只要在400年中少置闰三次即400年只需加97天就行了，即400年97闰。

如此置闰之后，400年的历年的平均长度是：$(365\times400+97)\div400=365.2425$日，它比回归年长了0.0003日，大约为26秒，这一误差积累约3333年又会多出1天，这一天，让后人们去调整，到需要调整时，在该置闰的年份不再置闰即可。

现行阳历总体上还不错，首先它的精度很高，使用起来也还方便，但最突出的问题是大小月十分混乱，这种结果是阳历在历史的演变过程中人为造成的。格里历的前身是奥古斯都历，后者又是从儒略历演变而来的。

罗马统治者儒略·凯撒(Julius Caesar)于公元前46年创立儒略历，公元前45年实行(他本人同年遇刺身亡)，儒略历规定：1、3、5、7、9、11共6个月(均为单数月份)为大月，每月31天，4、6、8、10、12共5个月为小月，每月30天，2月为平月，29天，全年365天。由于凯撒的生日在7月，所以定单数月份为大月，并以其名字命名7月为July。这一历法大小月安排比较合理，但颁布令中“隔三年安排一个闰年”被误解为“每三年安排一个闰年”，因此自公元前45年到公元前9年的36年中，应该置闰9次，但实际置闰12次，多置闰三次。为了改正这一错误，儒略·凯撒的继承人奥古斯都(August)下令，自公元前9年到公元4年不安排闰年，这样多闰的三次被消除了；自公元4年起，纳入正确的置闰轨道即每四年置

一闰，400 年 100 闰。奥古斯都觉得前任生日所在的月份为大月，且用名字命名生日所在的月份，于是他将自己生日所在月份 8 月也定为大月，且用自己的名字命名，并将 9 月以后的各月改成逢单为小月，逢双为大月，这样全年多出一天，于是在 2 月中扣除。为纪念这一系列改革，改革后的阳历称为奥古斯都历。奥古斯都的功绩在于消去了三个多余的闰年，但是他把月份的大小和日期搞得很乱，以至一直影响至今。另外他没有纠正儒略历中存在的一个重要问题：儒略历历年的长度是 365.25 日，它比回归年长 0.0078 日，也就是说每年约提早 0.0078 日，约 11 分钟 14 秒，长时间积累后，误差已达到不能容忍的地步。比如，自公元 325 年到 1582 年的 1257 年中，共多出了 9.8 天，这给人们的许多活动造成不便。这一点奥古斯都没有纠正。为了克服这一问题，当时罗马教皇格里高利十三世，于 1582 年下令，把 1582 年 10 月 5 日改为 10 月 15 日，即删除了 10 日（图 1–27）。删除 10 日后，并没有从根本上解决问题，于是又修改了阳历的置闰规则，即将 4 年 1 闰年（400 年 100 闰）改为 400 年 97 闰（即现行置闰制）。这次改革后的阳历叫格里高利历，又称新历（奥古斯都历被称为旧历）。由于种种原因在改为新历后，有些国家仍使用旧历，并持续很长时间，比如沙皇俄国一直使用旧历，直到十月革命（旧历为 1917 年 10 月 25 日，新历为同年 11 月 7 日）后才改用新历，这就是为什么前苏联每年 11 月 7 日要庆祝十月革命的原因。

1582年 10月

日	一	二	三	四	五	六
	1	2	3	4	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

图 1–27 1582年 10 月的月历

3. 阴阳历

既考虑朔望月，又兼顾回归年，并以朔望月为主的历法叫阴阳历。它实际是一种特殊的阴历或改进了的阴历。它的特点是：历年以回归年所相当的朔望月数为标准，是历月的十二或十三倍，是历日的整数倍；历月体现月相循环，以朔望月为标准安排大月和小月；历日对应月相循环。

我们知道，阴历平均历年是 354.3672 日，比回归年短了近 11 日，只需约 17 年，阴历日期同季节就会发生倒置。为了避免这种情况发生，就要控制这 11 日。具体方法是：约三年就积满了 30 日，因此在历年中额外加上一个月即闰月，这一年有十三个月，因而叫闰年，闰年有 383（或 384）天。在总年数中，闰年数占 36.83%。目前采用的是 19 年 7 闰，置闰后历年的平均长度为：$29.5306\times(19\times12+7)\div19=365.2469$ 日，与回归年长度 365.2422 日相差 0.0047 日，大约经 213 年误差一天，显然，很接近回归年，这就解决了阴历中，11 日误差积累而造成若干年后，日期与季节不相吻合的情况。我国民间所使用的传统历法夏历（俗称农

历、阴历等)就是阴阳历。

阴阳历的置闰规则是19年7闰,那么19年中哪7年是闰年呢?我们首先要介绍24气。农历本身没有实际的季节意义,因而只能记事,不能指导农业生产。我国的农历虽然对阴历作了改进,但对指导农业生产仍然没有实际意义。因此,我国古代劳动人民在农历中并行安排有二十四气(表1–3),并于战国末期完善了其名称。为了便于记忆,民间有如下关于节气的歌诀:

春雨惊春清谷天,夏满芒夏暑相连;秋处露秋寒霜降,冬雪雪冬小大寒。

每月两节不变更,最多相差一两天;上半年来六廿一,下半年来八廿三。

表1–3 二十四气表

序号	节月	季节	节气或中气名称	太阳黄经	太阳赤经	阳历日期
1	一月	春季	立春	315°	−16°20′	2月4(5)日
2	一月		雨水	330°	−11°32′	2月18(19)日
3	二月		惊蛰	345°	−5°57′	3月6(5)日
4	二月		春分	0°	0°	3月21(20)日
5	三月		清明	15°	5°57′	4月5(4)日
6	三月		谷雨	30°	11°32′	4月20(21)日
7	四月	夏季	立夏	45°	16°20′	5月5(6)日
8	四月		小满	60°	20°16′	5月21(22)日
9	五月		芒种	75°	22°44′	6月6(5)日
10	五月		夏至	90°	23°26′	6月21(22)日
11	六月		小暑	105°	22°44′	7月7(8)日
12	六月		大暑	120°	20°16′	7月22(23)日
13	七月	秋季	立秋	135°	16°20′	8月8(7)日
14	七月		处暑	150°	11°32′	8月23(24)日
15	八月		白露	165°	5°57′	9月8(7)日
16	八月		秋分	180°	0°	9月23(24)日
17	九月		寒露	195°	−5°57′	10月8(9)日
18	九月		霜降	210°	−11°32′	10月23(24)日
19	十月	冬季	立冬	225°	−16°20′	11月7(8)日
20	十月		小雪	240°	−20°16′	11月22(23)日
21	十一月		大雪	255°	−22°44′	12月7(8)日
22	十一月		冬至	270°	−23°26′	12月22(21)日
23	十二月		小寒	285°	−22°44′	1月6(5)日
24	十二月		大寒	300°	−20°16′	1月21(20)日

二十四气是把黄道等分成二十四段,每段15°,太阳周年视运动每经过一段的时间为一气,由于太阳周年视运动是不均匀的,各气的时间长度略有差别。由上可见,二十四气与太阳视运动相联系,在阳历中的日期基本上是固定的,因此它从本质上来说应属于阳历的范畴,因而可以指导农业生产。

二十四气可分两组，单数序号为一组，称为节气，双数序号为一组，称为中气。我国农历的一个特点是以月相定日序：即朔为初一，望为十五；连续两次朔所包含的日数多少定大小月，大月 30 日，小月 29 日，历日轮转与月相变化同步。另一特点是以中气定月序：即“雨水”（全年第一个中气）所在的月份为一月，“春分”（全年第二个中气）所在的月份为二月……以此类推。但是一个回归年有 12.3683 个朔望月，三个回归年就有 37 个朔望月，但三个回归年里只有 36 个中气，因此在三年中肯定有一个月没有中气。因此定这个没有中气的月份为上一个月的闰月。如 2009 年，农历五月对应的阳历日期是 5 月 24 日至 6 月 22 日，有中气夏至，因而定为五月，而下一个月对应的阳历日期是 6 月 23 日至 7 月 21 日，其中没有中气，因而定为闰五月。我国农历的第三个特点是同时采用干支纪年，干支是天干和地支的合称。天干有 10 个：甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸。地支有十二个：子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥。天干与地支依次搭配，构成六十个不同组合，称“六十甲子”，（表 1–4）。

表 1–4 干支表

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
00		甲子	乙丑	丙寅	丁卯	戊辰	己巳	庚午	辛未	壬申
10	癸酉	甲戌	乙亥	丙子	丁丑	戊寅	己卯	庚辰	辛巳	壬午
20	癸未	甲申	乙酉	丙戌	丁亥	戊子	己丑	庚寅	辛卯	壬辰
30	癸巳	甲午	乙未	丙申	丁酉	戊戌	己亥	庚子	辛丑	壬寅
40	癸卯	甲辰	乙巳	丙午	丁未	戊申	己酉	庚戌	辛亥	壬子
50	癸丑	甲寅	乙卯	丙辰	丁巳	戊午	己未	庚申	辛酉	壬戌
60	癸亥									

我国的纪年经过几次变革，有帝制后，最早用皇帝年号（即帝号）纪年，大约到东汉章帝元和二年（公元 85 年，乙酉年）开始使用干支纪年，这样干支与帝号并行使用，不会造成历史记事的混乱。公元纪年则在辛亥革命后倡导广泛使用，但真正开始使用是在中华人民共和国成立后。

分析公元纪年数和干支纪年的关系，建立下表：

表 1–5 天干、地支排序表

排序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
天干	庚	辛	壬	癸	甲	乙	丙	丁	戊	己		
地支	申	酉	戌	亥	子	丑	寅	卯	辰	巳	午	未

公元纪年数对应的干支纪年可用下述方法求算：公元年数的尾数对应天干的排序号；公元年数除以 12 的余数对应地支的排序号。例如：2008 年奥运会在我国首都北京举行，该年对应的干支纪年为：2008 年的 8 对应天干“戊”，2008 ÷ 12 = 167 余 4，4 对应地支“子”，因此 2008 年为戊子年。

另外,我国夏历还有干支纪月、纪日和纪时的安排。

思考与练习

1. 解释下列名词

天体系统、天赤道、黄道、天极、地平圈、天顶、上点、春分点、秋分点、夏至点、冬至点、子午圈、卯酉圈、春分圈、时圈、方位、时角、赤经、高度、赤纬。

2. 写出下列天球大圆的两极和天球大圆的交点。

地平圈____________; 子午圈____________; 天赤道____________;

卯酉圈____________; 黄　道____________; 六时圈____________。

子午圈与地平圈____________,子午圈与天赤道____________,

子午圈与卯酉圈____________,子午圈与六时圈____________,

天赤道与地平圈____________,天赤道与黄道____________。

3. 天北极的黄纬和黄经是多少? 黄北极的赤纬和赤经是多少?

4. 计算二分二至时太阳的赤纬、赤经、黄纬、黄经。

节　气	太阳赤纬	太阳赤经	太阳黄纬	太阳黄经
春　分				
夏　至				
秋　分				
冬　至				

5. 已知纬度是30°N,恒星时$S=6^h30^m$,请完成下表。

坐标点	高　度	方　位	赤　纬	时　角	赤　经
天　顶					
天　底					
北天极					
南天极					
东　点					
西　点					
南　点					
北　点					
上　点					
下　点					

6. 何谓星空区划? 试述88个星座在天区的分布并写出黄道带的星座。

7. 简述四季星空的特点。

8. 获得宇宙信息的渠道有哪些?

9. 天文光学望远镜有哪几种？射电望远镜主要由哪几部分构成？

10. 为什么要设立国际日期变更线？已知东八区的区时为 2008 年 1 月 13 日 8 时，求西九区的区时？

11. 何谓历法？常用的历法有哪些？各有什么特点？

第二章　地球和地月系

地球是太阳系八大行星之一，从大小、质量、运动等物理性质和特征看，是太阳系的一颗非常普通的行星。但是，地球是我们人类的家园，是我们目前所知道的唯一有生命现象的星球，从这一点看，它又是太阳系中一颗特殊的行星。地球有一颗天然卫星——月球，它们构成宇宙中比较低级的天体系统之一：地月系。

第一节　地　球

地球对人类来说，是一颗十分重要的星球，由于我们生活在这个星球上，我们对它的认识比其它行星的认识要深刻得多，但仍然存在许多未知领域。

一、地球的物理特征与结构

人类对地球的认识经历了相当长的时间，对它的形状大小及复杂的运动有比较清晰的认识，但是对其内部的结构、物质组成及运动状态等的认识，远没有达到十分准确的程度。

1. 地球的形状和大小

地球是球形的认识，可上溯到公元前五六世纪。后来的亚里士多德根据月食时月球上地影是一个圆弧，第一次科学地论证了地球是个球体。公元前三世纪，古希腊的地理学家埃拉托斯特尼成功地用三角测量法测量了阿斯旺和亚历山大城之间的子午线长度(图 2-1)。

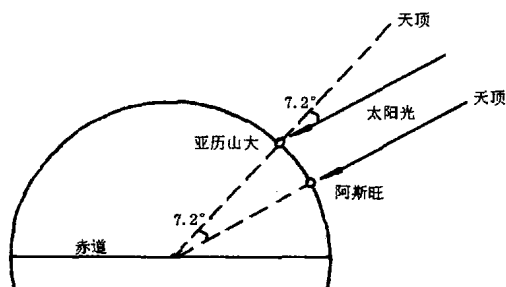



图 2-1 用三角测量法测量阿斯旺和亚历山大城之间的子午线长度

早在战国时期，我国哲学家惠施已提出地球是球形的看法。唐朝时期，在一行的指导下，由南宫说率领的测量队在河南进行了最早的弧度测量，算出了北极的地平高度差一度，相当于南北地面距离相差约 351 里 80 步(唐朝的长度单位 5 尺 =1 步，300 步 =1 里)，从而可算出地球的半径。这项工作比阿拉伯人的类似工作约早 100 年。在现代，除用大地测量方法外，还可用重力测量确定地球的均衡形状。人造地球卫星上天后，地球动力学测地方法得到很大发展。各种方法的联合使用，使得地球形状和大小的测定精度大大提高。1976 年国际天文学联合会天文常数系统中，地球赤道半径为 6 378 140m，地球扁率为 1/298.257。地球不是正球体，而是扁球体。人造地球卫星的观测结果表明，地球的赤道也是个椭圆，据此可认为地球是个三轴椭球体。地球自转产生的惯性离心力，使得球形的地球由两极向赤道逐渐压缩，成为目前的略扁的旋转椭球体形状，极半径比赤道半径约短 21km。地球内部物质分布的不均匀性，进一步造成地球表面形状的不规则性。在大地测量学中，所谓的地球形状是指大地水准面的形状，在这个面上重力位各处相同，是个等位面。

2. 地球的圈层结构

地球可以看作由一系列的同心圈层组成。地球的内部由地壳、地幔和地核(又分外核和内核)(图 2-2、图 2-3，表 2-1)。地壳厚度不均，大陆上较厚，平均约为 33km，海洋上较薄，平均约为 7km。地壳是由富含较轻的硅和铝(即硅铝层)的花岗岩类岩石和富含硅铝及镁铁(即硅镁层)的玄武岩类岩石所组成。地幔则主要是富含铁镁的硅酸盐矿物组成的橄榄岩，其上部(约几十千米)是刚性的固体岩石层，它与地壳共同组成岩石圈(厚度为 70 ~ 100km)；其下部(即岩石圈之下)岩石已接近熔融状态，易于流动。根据地震波探测推断，外核是液态，内核是固态。地核的物质成分，据推测主要是铁和镍等重物质所组成。

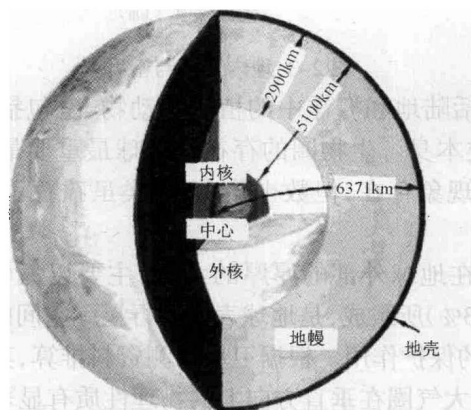



图 2-2 地球的内部结构

表 2-1 地球内部圈层、厚度及密度

圈 层	上限深度 (km)	上限密度 (g/cm³)	下限深度 (km)	下限密度 (g/cm³)	厚 度 (km)
地 壳	0	/	15	(2.83)	15
地 幔	15	3.31	2 878	5.62	2 863
外 核	2 878	9.89	5 161	12.70	2 283
内 核	5 161	12.70	6 371	13.00	1 210

地球的外部结构主要由岩石圈、水圈、生物圈、大气圈和磁层组成。

岩石圈是地球的表层，包括地壳和地幔的上部，厚度为 70～100km。由火成岩、沉积岩、变质岩及薄薄的土壤层所构成。

水圈包括海洋、湖泊、江河等地表液态和固态水以及地下水，甚至包括大气中的水分，大面积的海洋（约占地球表面积的 71％）是在外层空间回眺地球所见到的最突出的特点。

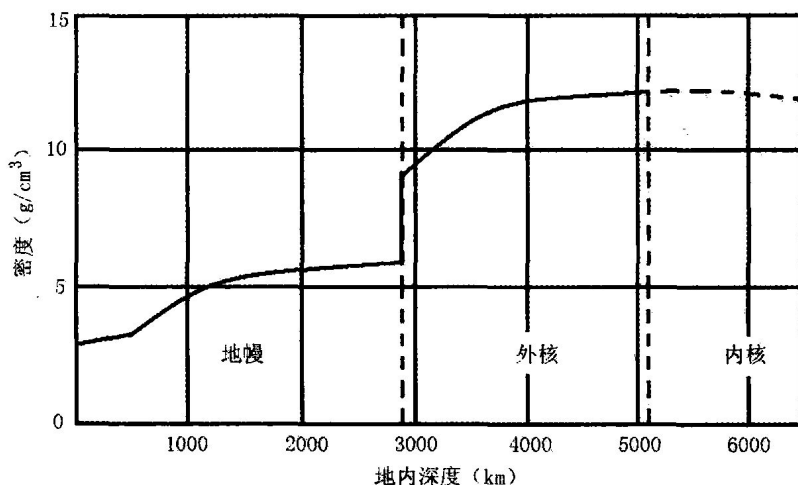



图 2-3 地内分层与密度

生物圈不仅包括陆地和海洋中的植物和动物，也包括空气、陆地和海洋中微生物，还包括人类本身。生物圈的存在是地球最重要最突出的特点，虽然推测宇宙中也有生命现象存在，但数十年来，人类虽孜孜不倦的探测，至今却仍一无所获。

大气圈是包裹在地球外部的厚厚的大气，主要以氮（约占 78%）、氧（约占 21%）和氩（约占 0.93%）所组成，是地球表面到行星际空间的过渡圈层，对地球和人类等生物有重要的保护作用。根据卫星探测资料推算，其厚度大约在 2 000～3 000km。观测证明，大气圈在垂直方向上的物理性质有显著差异。根据温度的垂直分布、成分和电荷等物理性质，同时考虑大气的垂直运动情况，可将大气圈自

下而上分为五层:①对流层:对流层厚度因纬度而异,自高纬到低纬在 9~17km 之间。该层的主要特点是温度随高度升高而降低、空气垂直运动强烈、气象要素水平分布不均且主要天气现象发生在该层。对流层与我们人类关系最为密切。②平流层:平流层位于对流层顶至 55km 左右的高度,该层的显著特点是温度随高度升高不变或升高、空气多平流运动、吸收和阻挡了 99% 以上的太阳紫外辐射,层内有一厚度约 20km 的臭氧层,对地球上的生物特别是人类有重要保护作用。③中间层:中间层位于平流层顶至 85km 左右的高度,该层的显著特点是温度随高度升高而降低、空气垂直运动强烈,因而又称高空对流层。④电离层:电离层位于中间层顶至 500km 左右(亦有人认为可达 800km)的高度,该层的显著特点是温度随高度升高而迅速升高、空气很稀薄且处于高度电离状态,在高纬度地区所看到的极光多发生在该层。⑤散逸层:散逸层位于电离层顶之上,是地球大气的最高层,因而也被称为外层大气,该层的显著特点是温度随高度升高很少变化、空气十分稀薄、大气粒子经常散逸至星际空间,该层上部可认为是大气圈和星际空间的过渡地带。

由于地球内部的物质组成、分层结构、物理性质和地球的运动特征(如自转)而使地球具有磁场。地球磁场是一个偶极磁场,它在高空受太阳风的强劲“吹送”,在地球向着太阳一侧,地球磁场被压缩成一个距地心大约是 8~11 个地球半径(太阳活动强烈时只有 5~7 个地球半径)的包层;在地球背着太阳一侧,地球磁场则延伸很远,形成一个长达数百甚至数千个地球半径的磁尾,这样在地球的外部就形成了一个所谓的磁层(图 2-4)。地球磁层的边界称为磁层顶,磁层顶与太阳高能粒子之间是一个厚度约为 3~4 个地球半径的过渡带,称为磁鞘。

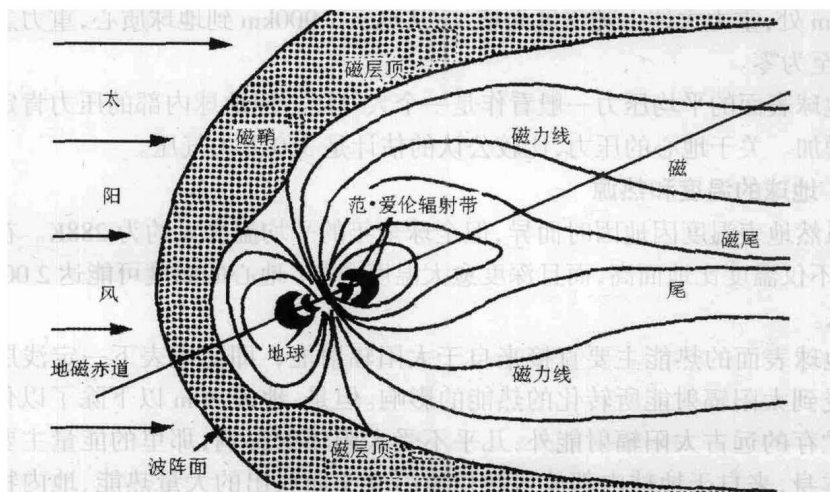



图 2-4 地球磁层

3. 地球的质量和密度

地球的质量为 5.977×10^{24}kg。获得这一数值，人类颇费一番周折，起初人们无法想象如何“称”出地球的质量，在开普勒发现行星运动三定律后，牛顿于1687发现了万有引力定律，然后对开普勒行星运动三定律进行了修正，在万有引力定律理论指导下，英国科学家卡文迪什于1798年用扭秤法第一次成功测定两物体间的引力，并求得万有引力常数G，现在使用的万有引力常数为 6.67×10^{-8}dyne $cm^2\,g^{-2}$。1881年科学家约利设计出一台灵敏度很高的天平和一套方案，巧妙地“称”出地球的质量。现代获知地球质量可以通过人造地球卫星。设地球的质量为M，人造地球卫星的质量为m，卫星绕地公转轨道半长轴为a，绕转周期为T，根据牛顿修正后的开普勒第三定律 $a^3/T^2(M+m)=G/4\pi^2$，在已知卫星质量前提下，只要测定卫星绕地公转轨道半长轴a和绕转周期T，即可依上式“算”出地球的质量M。

知道地球的半经，可以求出它的体积，再知其质量，密度可轻而易举获得：$\rho_{\oplus}$=5.54g/cm^3。当然这里给出的是地球的平均密度，事实上地球的密度特别是其内部的密度是不均匀的(见表2-1)。

4. 地球的重力和压力

地球的重力是地球引力和地球自转所产生的惯性离心力的合力。由于地球是一个扁球体，且各地的惯性离心力不同，因此重力因纬度不同，也因高度和深度不同。就纬度而言，一般随纬度增高而增大。但也有因地内物质分布不均而造成局部地区的重力异常。就高度和深度而言，重力随高度升高而减小是较为简单的规律，但重力随深度的分布则较为复杂，一般认为：从地面到地下2 900km处，重力大体上随深度而增加；从地下2 900km到地球质心，重力急剧减小，直至为零。

地球表面的平均压力一般看作是一个大气压，但地球内部的压力肯定随深度而增加。关于地心的压力，比较公认的估计是350万大气压。

5. 地球的温度和热源

虽然地表温度因地因时而异，但全球全年的平均温度大约为288K。在地球内部，不仅温度比地面高，而且深度愈大温度愈高。地心的温度可能达2 000K至3 000K。

地球表面的热能主要直接来自于太阳辐射能，即使地表下一定浅层深度也会受到太阳辐射能所转化的热能的影响。但是，地表30m以下除了以化石燃料所贮存的远古太阳辐射能外，几乎不受太阳辐射影响，那里的能量主要来自地球本身，来自于地球内部放射性物质因衰变而放出的大量热能、地内物质因压缩增温而放出的热量以及地内物质分异过程中因降低重力位能而产生的大

量热能等。

二、地球的运动

地球和宇宙万物一样，时刻处于不停的运动中，这些运动既包括地球内部的运动，也包括地球作为一个整体在宇宙空间的运动。在众多复杂的运动中，最基本、最重要的是地球的自转和公转。

1. 地球的自转

地球绕自身旋转轴线的转动叫地球的自转。早期人类并没有认识到地球是自转的，因而把天体的东升西落这种周日视运动看作是天体的真实的运动，于是也就得出地球是宇宙的中心即地心说这一错误的结论。直到16世纪中叶，才由近代天文学奠基人哥白尼首先从理论上给予论证。

(1) 地球自转的证明及自转方向

要证明地球自转有不少方法，其中最著名最直观的实验是法国物理学家傅科设计的“摆”(后人称之为傅科摆)。我们知道“摆”有一重要特性，即摆不受外力作用，摆动平面不变。因此如果地球不自转，摆就不受外力作用，摆动平面就不会发生变化；相反，如果地球自转，摆就要受到地球自转力的作用，摆动平面就会发生变化。傅科设计的摆由重锤(数十千克)、长绳(数十米)和灵巧的悬挂装置所组成，它可以克服空气阻力长时间保持惯性摆动，在长时间摆动中，地球亦在自转，因此，摆动平面相对于初始摆动平面会发生缓慢的、持续的向右即沿顺时针方向(北半球；南半球则向左即沿反时针方向)偏转。由于傅科摆偏转方向与地球自转是相对运动，因此它不仅证明了地球是自转的，还生动地表明地球是按反时针方向(北半球)自转的，即自西向东自转，所谓自西向东就是伸出半握拳右手，大拇指指向天北极，则其余四指指向即为地球自转方向。这种描述的优点是具有全球统一性。另外，傅科摆的偏转速度(即单位时间内偏转的角度)与纬度的正弦成正比，可用下式表示：

$$\Delta\theta = \sin\phi \cdot 15°/\mathrm{h}$$

式中 ϕ、h 分别是地理纬度和小时。显然赤道上 $\Delta\theta = 0°/\mathrm{h}$，两极 $\Delta\theta = 15°/\mathrm{h}$。也就是说，随着纬度的增大，傅科摆的偏转速度也相应增大。

(2) 地球自转的周期

地球自转的周期粗略地说是1“日”。但是由于参考点的不同，“日”的名称和长度也有不同。

恒星日(参考点为某一恒星，天文学上以春分点来定义)：同一恒星(或春分点)连续两次在同地上中天的时间间隔。它是地球自转的真正周期(有细微差别)，亦即地球自转360°所需要的时间。理论上为24小时，但实际应用的是23小

时 56 分。天文学上之所以不以具体恒星而以春分点作参考点，是因为恒星日是同恒星时相联系的(见第一章第四节)，而恒星时是春分点的时角。

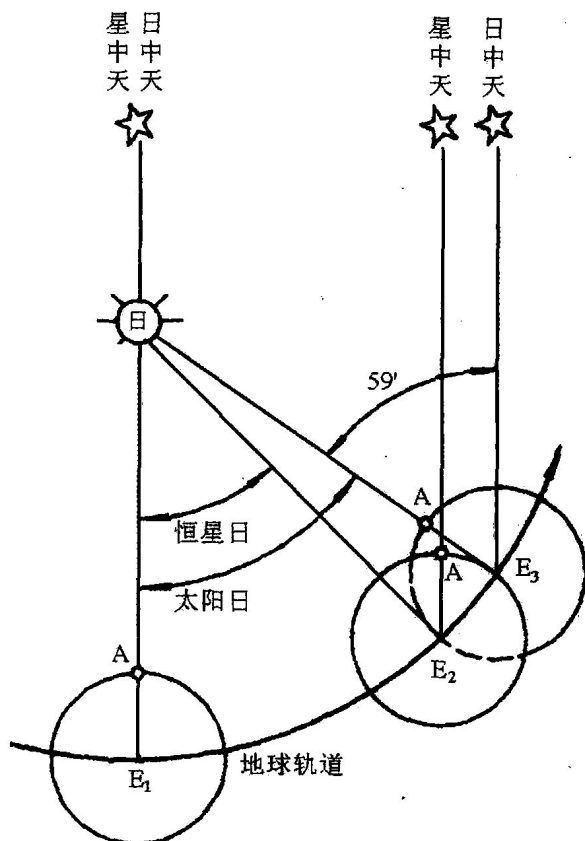
太阳日（参考点为太阳中心）：太阳中心连续两次在同地上中天的时间间隔。理论上为 24 小时 04 分，但实际应用的是 24 小时(详见第一章第四节)。显然太阳日比恒星日长 4 分钟，造成这一结果的原因是：恒星位置可看作是固定的，在一个恒星日内，地球自转 360°，但由于地球的公转，太阳相对于恒星空间，每天自西向东有 59′的运动，也就是说太阳中心在地球同地连续两次上中天时，即在一个太阳日内，地球公转 59′，自转 360°59′，其中多转的 59′大约需要 4 分钟(图 2-5)。

在一个恒星日内，地球自转 360°，在一个太阳日内，地球自转 360°59′

图 2-5 恒星日与太阳日比较

太阴日(参考点为月球中心)：月球中心连续两次在同地上中天的时间间隔。理论上为 24 时 54 分，但实际应用的是 24 小时 50 分。显然太阴日比恒星日长 54 分钟，造成这一结果的原因同样是：恒星位置可看作是固定的，在一个恒星日

内，地球自转 360°，但在地球自转 360°的同时，月球绕地球公转 13°10′，地球本身还同时绕日公转，也就是说月球中心在地球上同一地点连续两次上中天时，即在一个太阴日内，地球自转了 373°38′，其中多转的 13°38′大约需要 54 分钟（图 2-6）。

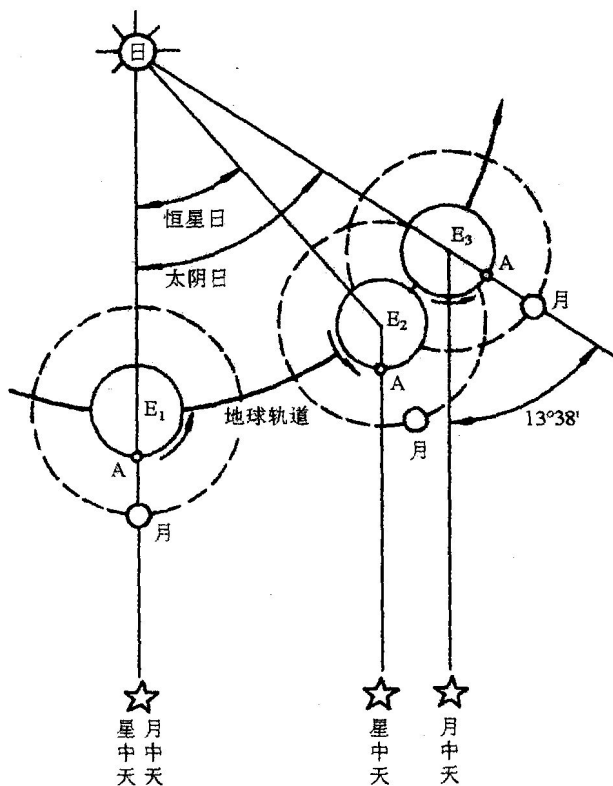



图 2-6 恒星日与太阴日比较

上述恒星日、太阳日、太阴日的理论长度，是以恒星日和恒星时为标准，即地球自转 360°用 24 恒星时，每恒星时自转 15°。但太阳日的长度为 24 时 04 分，可在日常生活中，人们更习惯以 24 小时作为太阳日的长度，以此作标准，可推出恒星日、太阴日的实际长度分别是 23 小时 56 分和 24 小时 50 分。

（3）地球自转速度

地球自转速度有自转角速度和自转线速度之分。自转角速度可由自转周期求得，即 $\omega_{\oplus}$=15°/ 恒星时，若采用太阳时则：$\omega_{\oplus}$=15°02′06″/ 太阳时。也可粗略地说 $\omega_{\oplus}$=15°/ 时。显然，除了地球两极点外，地球的自转角速度全球一致，既不随纬度变化而变化（图 2-7），也不随高度变化而变化。

地球自转线速度是指地球球面上的一点，由于地球的自转，单位时间内在空

间走过的距离。这个速度与旋转半径成正比，而旋转半径随纬度增高而减小，因此纬度越低，地球自转线速度越大，反之越小，直到两极点地球自转线速度为零（图 2-7）。自转线速度可用下式求得：

$$V=2\pi R/T$$

式中，R 为旋转半径，等于 $R_{\oplus}\cos\phi$（$R_{\oplus}$为地球半径，ϕ 为地理纬度）；T 为自转周期，等于 85164 秒。这样我们可得到求任意纬度海平面上的自转线速度公式：

$$V_{\phi}=465\text{m/s}\cos\phi。$$

地球自转速度是变化的，既有长期减慢、季节变化，又有不规则变化。长期减慢的主要原因是月球和太阳对地球引潮力，引起海洋潮汐，海洋潮汐的摩擦作用，使地球自转速度不断缓慢减慢。季节变化则与大气环流的季节调整有关。不规则变化则是由于地球内部和外部的物质移动和能量交换所致。太阳的强烈活动也会影响地球的自转速度，如 1956 年 2 月 23 日及 1959 年 7 月 15 日太阳出现特大耀斑，造成地球自转速度突然变慢，日长分别增加了千分之九点七秒和万分之八秒。

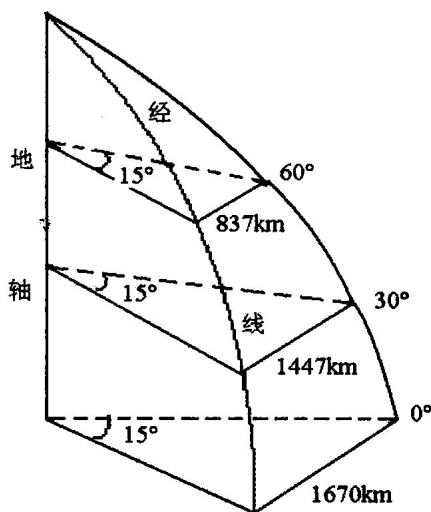



图 2-7 地球自转角速度与线速度

地球自转会造成以下一些后果，一是不同天体的周日运动（见第一章第二节），二是这种较快自转叠加缓慢公转形成地球上的昼夜交替，三是使水平运动物体方向发生偏转。在北半球向物体运动方向右侧偏转，在南半球向物体运动方向左侧偏转。这种偏转是由于地球自转所造成，造成这种偏转的力称为地转偏向力，它是法国学者科里奥利最早研究并证明它的存在，故称之为科里奥利力，简称科氏力。地转偏向力的方向是：在北半球，垂直指向物体运动方向的右侧；南半球相反。对于单位质量物体，地转偏向力大小可用下式表示：

$$A=2V\omega\sin\phi$$

式中 V 是物体运动的速度；ω 是地球自转角速度；φ 是地理纬度。分析上式可得出以下几点结论：一是地转偏向力只改变物体运动方向，不改变物体运动速率；二是静止物体地转偏向力为零，地转偏向力与物体运动速度成正比；三是赤道上地转偏向力为零，地转偏向力与纬度的正弦成正比。地转偏向力影响地球大气环流，对形成行星风带、天气系统和洋流有重要作用。

2. 地极移动和地轴进动

（1）地极移动

地极移动简称极移，是地极位置在地球表面移动的现象。我们知道，地极是地轴与地球表面的交点，把地轴的空间指向看作不变，极移是地球自转中有轻微摆动所造成，这种摆动一方面是非刚体地球的自由摆动，另一方面是由大气作用引起的受迫摆动。不过极移的范围很小，不超过 ± 0″.4。极移会造成各地地理纬度的系统性变化（虽然很小），同时地理经度和方位角也会发生微小的变化。

（2）地轴进动

在外力作用下，地球自转轴（无限延长为天轴）在空间并不保持固定方向，而是不断发生变化，从而导致南北天极在天球上的移动，这种现象叫地轴进动。它反映了地轴在宇宙空间绕黄轴所作的圆锥运动。

地轴进动具有以下一些特性：地轴进动的方向向西，与地球公转方向相反；地轴进动的速度为 50″.29/ 年，周期 25 800 年；地轴作圆锥运动的轴线垂直于地球公转轨道平面即黄道面，并指向黄极，圆锥半径为 23°26′。

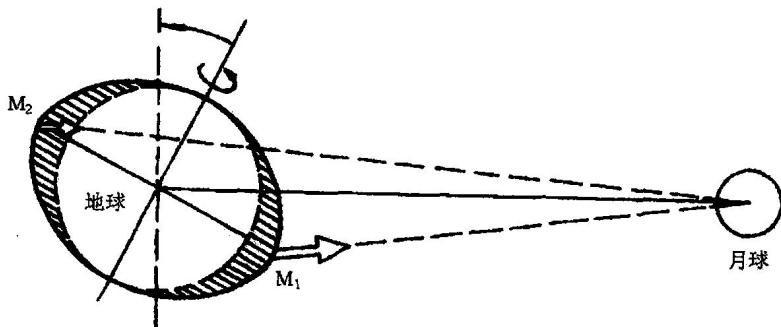



图 2-8 地轴进动的原因

地轴产生进动与地球的形状、黄赤交角和地球自转有关。如果地球是正球体，地轴不会产生进动，但是地球是一个扁球体，在环赤道附近有隆起的附加质量（图 2-8），月球和太阳除了对这个扁球体中心球体有一个平均引力外，对环赤道附近隆起的附加质量还有一个附加引力。当然，如果黄道面、白道面与天赤道面重合即黄赤交角、白赤交角为零，地轴也不会产生进动，但是黄道面与天赤道

面有 23°26′夹角，白道面与黄道面有 5°09′夹角，白道面与天赤道面的夹角可达 28°35′，因此，日、月对地球这个扁球体中心的平均引力和对环赤道附近隆起的附加质量的附加引力之间会产生力矩。再叠加地球自转，最终导致地轴进动。

地轴进动会造成一系列的后果。首先，地轴进动会导致天极的周期性变化，亦即北极星的变迁；天极以地轴进动的方向、速度和周期作圆周运动，北极星也以相同的方向、速度和周期依次更替（图 2–9）。其次，地轴进动使二分点以同样的方向（向西）和速度沿黄道西移，造成以春分点为参考点的回归年略短于恒星年，它们之间的差值 20 分 24 秒称为岁差；第三，由于春分点西移，使得以春分点为原点的赤道坐标系中恒星的赤经、赤纬和黄道坐标系中恒星的黄经都发生缓慢、持续的系统性变化。

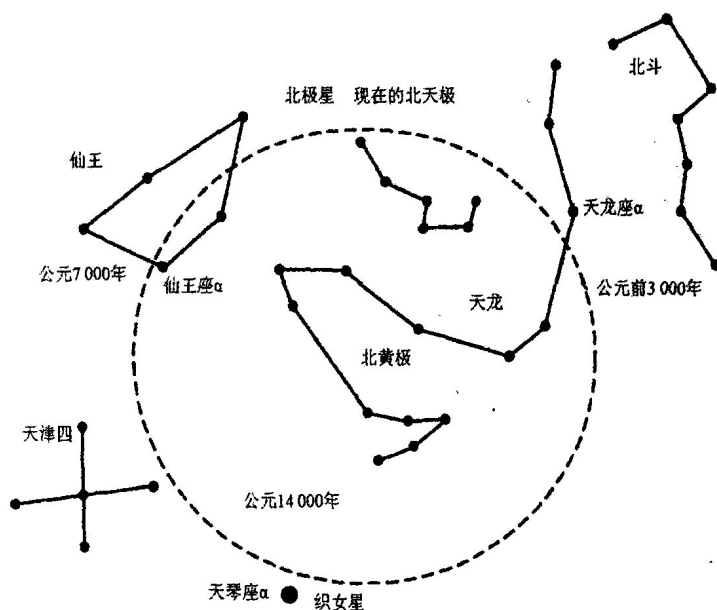



图 2–9 地轴进动导致北极星的变迁

3. 地球的公转

（1）地球公转的证明及公转方向

地球和其它大行星一样以自己的特有轨道，却以相同的方向绕太阳运行，这就是地球的公转。地球的公转方向与其自转方向相同，即自西向东。哥白尼的“日心说”应该是人类最早认识地球绕太阳公转的理论，但却遭到“地心说”拥护者的强烈反对，他们指出，如果地球绕日公转，地球在公转轨道上的不同位置，观测同一恒星，恒星的视位置应有所不同（图 2–10，另见第四章第一节），这就是恒星的视差，它是证明地球绕太阳公转的关键之一，直到 1838 年及随后，白塞耳等人测

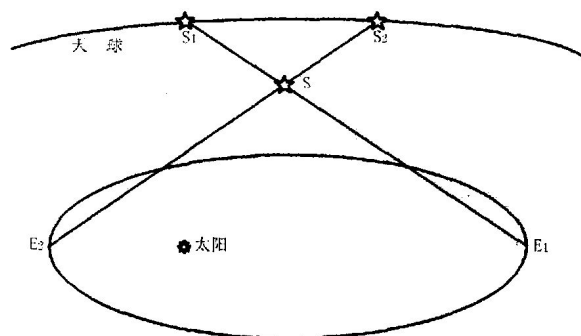
出几颗较近恒星的周年视差，才最终扫除确立"日心说"的"最后障碍"，地球绕太阳公转也就得到普遍确认。

地球在 E_1、E_2 位置时看恒星 S，其在天球上的视位置分别是 S_1、S_2

图 2-10　地球绕太阳公转造成恒星的视差位移示意图

光行差也可用以证明地球的公转。光行差是地球轨道速度对于光速的影响。在地球上看，恒星光以每秒 300 000km 的速率射向地球的同时，又以每秒 30km 的相对速率作平行于轨道面的运动，因此，我们所看到的是星光的视方向，它是上述两种运动的合成方向。这样，我们只要测定恒星的光行差，也就证明地球是绕太阳公转的。

另外，多普勒效应也可以证明地球公转。光是一种波动，波源与观测者的相对运动会使观测到的波的频率发生变化，这种现象叫多普勒效应。当波源接近观测者时，频率变短，即向短波方向移动，称"紫移"；当波源远离观测者时，频率变长，即向长波方向移动，称"红移"；地球在绕太阳公转过程中，对公转轨道面附近的同一恒星，半年时间接近它，另半年时间则远离它，在地球上观测这颗恒星的光谱就会发现，半年时间光谱有紫移现象，另半年时间光谱有红移现象。这就有力证明地球是绕太阳公转的。

（2）地球公转的轨道

地球公转轨道是一个椭圆，轨道面（亦即黄道面）与地球的赤道面（亦即天赤道面）有一定夹角（图 2-11），即黄赤交角，现阶段这个角等于 23°26′。因此，地球侧身在轨道上公转。太阳位于这个椭圆的一个焦点上，地球一月初过近日点，距太阳 147 100 000km；七月初过远日点，距太阳 152 100 000km。地球的轨道参数如下：

轨道半长轴(a)：149 600 000km；	周　长(l)：940 000 000km；
轨道半短轴(b)：149 580 000km；	偏心率(e)：0.016；
半　焦　距(c)：2 500 000km；	扁　率(f)：1/7 000。

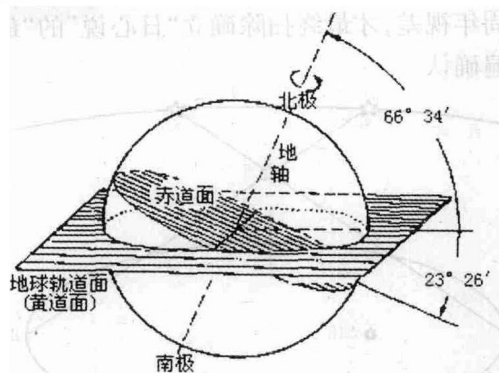



图 2–11 地球赤道面与地球公转轨道面的交角

(3) 地球的公转周期

地球公转的周期粗略地说是 1“年”。但是由于参考点的不同,“年”的名称和长度也有不同。

恒星年:以恒星(恒星应无明显自行)为参考点,太阳视圆面中心连续两次经过同一恒星的时间间隔。长度为 365.2564 日,即 365 日 06 时 09 分 10 秒,是地球公转的真正周期,即地球绕日公转 360°所经历的时间。这里用“太阳中心”来定义恒星年是因为:地球绕日公转 360°,太阳视位置亦以同样的方向在黄道上运行 360°。

回归年:以春分点为参考点,太阳视圆面中心连续两次经过春分点的时间间隔。长度为 365.2422 日,即 365 日 05 时 48 分 46 秒。由于春分点每年西移 50″.2,所以回归年比恒星年短 20 分 24 秒。这就是前面所讲的岁差。

近点年:以近日点为参考点,地球中心连续两次经过近日点的时间间隔。由于近日点每年东移 11″,因此,近点年长度为 365.2596 日,即 365 日 06 时 13 分 56 秒,比恒星年略长。

交点年(也叫食年):以黄白交点之一为参考点。太阳视圆面中心连续两次经过同一黄白交点的时间间隔。由于黄白交点每年西移 19°21′,因此食年长度为 346.6200 日,即 346 日 14 时 52 分 53 秒,短于恒星年。

以上的“日”均为平太阳日。

(4) 地球公转的速度

地球公转的速度有角速度和线速度之分。角速度在近日点为 61′10″/ 日,远日点为 57′10″/ 日(因日地距离而变化),平均值为 59′/ 日。线速度在近日点为 30.3km/s,在远日点为 29.3km/s(因日地距离而变化),平均值为 29.78km/s ≈ 30km/s。

根据开普勒第二定律,面速度不变。

(5) 地球公转的后果

地球公转引起一系列天文现象或后果。

恒星的周年视差：见第二章第一节中“地球公转的证明”和第四章第二节。

太阳的周年(视)运动：由于地球公转，太阳在天球上恒星之间每年自西向东走一圈的运动(图 1-2)。其运行的轨迹就是黄道(黄道两侧各约 8°的区域称为黄道带，图 1-15)，由于黄道和天赤道相交，因此，太阳有一段时间在天赤道以北(最北可达 23°26′)运行，有一段时间在天赤道以南(最南可达 -23°26′)运行，太阳这种以一年为周期的视运动称为太阳回归运动。太阳回归运动在地球上的表现是太阳直射点(太阳中心与地球中心连线和地面的交点)相对于地球赤道的往返移动，因为，任何时刻太阳赤纬总等于当时太阳直射点的地理纬度。直射点所达最大纬度为南北纬 23°26′，被称为南回归线与北回归线。除春分日和秋分日太阳直射点位于赤道上外，自春分日(3 月 21 日)至秋分日(9 月 23 日)，太阳直射点位北半球，其中自春分日至夏至日(6 月 22 日)，太阳直射点北移，自夏至日至秋分日太阳直射点南移；自秋分日至春分日，太阳直射点位南半球，其中自秋分日至冬至日(12 月 22 日)，太阳直射点南移，自冬至日至春分日太阳直射点北移。也就是说，自冬至日到夏至日，太阳直射点向北移，自夏至日到冬至日，太阳直射点向南移。

行星同太阳的会合运动：会合运动是指甲乙两者分开又会合的运动。行星和太阳之间相对视运动叫行星同太阳的会合运动。关于行星的会合运动、会合周期及行星同太阳相对位置的变化详见第三章第二节“行星的视运动”。

月球同太阳的会合运动：月球和太阳在天球上视行角速度不同；因此，月球同太阳也有类似于地外行星的会合运动，即月球和太阳的黄经差可以达 0°到 360°，当然可以是 0°、90°、180°和 270°四个特殊值，因而也就有类似于地外行星的合、冲(称朔、望)及东、西方照(称上弦、下弦)，也就有所谓的会合周期。月球同太阳的会合周期(S)可用下式求得：

$$1/S=1/M-1/E$$

式中 M 是月球绕地球公转周期(恒星月)，E 是地球绕日公转周期。

4. 地球运动的地理意义

(1) 昼夜交替与昼夜长短

昼夜是因为太阳的强烈光辉所致。太阳照耀的半球是昼半球——白天；太阳光照不到的半球(即另外半球)是夜半球——黑夜。昼半球和夜半球之间的分界线叫晨昏线(或晨昏圈)，它以太阳直射点为一个极点。而昼夜交替实际上是地球在相对缓慢绕日公转的同时快速自转所致。

地球上的纬圈一般被晨昏圈分成两部分，位于昼半球的叫昼弧，位于夜半球

的叫夜弧,弧长15°折合1小时。白昼长短可用半昼弧公式求得:

$$\cos t=-\operatorname{tg}\phi\operatorname{tg}\delta$$

式中t为太阳时角(即半昼弧)、ϕ 为地理纬度、δ 为太阳赤纬,ϕ、δ 均以北半球为正,南半球为负。特别指出,用半昼弧公式求出t后乘以2才是白昼的长度(T)。显然,决定昼夜长短主要是地理纬度和太阳赤纬两个因素,前者是空间(地理)因素,表明特定日期,昼夜长短的纬度分布;后者是时间(季节)因素,表明特定纬度,昼夜长短的季节变化。

分析半昼弧公式 $\cos t=-\operatorname{tg}\phi\operatorname{tg}\delta$,我们可以得出:

当 $\delta>0°$(开区间)时,$\operatorname{tg}\delta>0$;对北半球来说,$\phi>0°$,$\therefore\operatorname{tg}\phi>0$;因而 $\cos t<0$,t在第二象限,即 $t>6$ 小时,$T=2t>12$ 小时,昼长而夜短。若 $\delta<0°$,则南半球昼长而夜短。可见,昼长夜短的条件是 δ 和 ϕ 同号。当 ϕ 越大时,$\operatorname{tg}\phi$ 也越大,T也越大;当然,δ 越大,T也越大;当 $\phi=90°-\delta$ 时,$\operatorname{tg}\phi=\operatorname{ctg}\delta$,$\cos t=-1$,$\therefore t=180°=12$ 小时,,$T=2t=24$ 小时。显然,在 $\phi\geqslant90°-\delta$ 的区域都有极昼现象。

当 $\delta>0°$(开区间)时,$\operatorname{tg}\delta>0$;对南半球来说,$\phi<0°$,$\therefore\operatorname{tg}\phi<0$;因而 $\cos t>0$,t在第一象限,即 $t<6$ 小时,$T=2t<12$ 小时,昼短而夜长。若 $\delta<0°$,则北半球昼短而夜长。可见,昼短夜长的条件是 δ 和 ϕ 异号。类似上面的讨论,我们可以得出极夜的条件是 $\phi\geqslant90°+\delta$。

当然,式中若 $\phi=0°$(即在赤道上),则 $\operatorname{tg}\phi=0$,不论 δ 为何值,$\cos t=0$,$t=90°=6$ 小时,$T=2t=12$ 小时,即昼夜等长。也就是说,赤道上四季昼夜平分。同样,式中若 $\delta=0°$(即春、秋二分),则 $\operatorname{tg}\delta=0$,不论 φ 为何值,$\cos t=0$,$t=90°=6$ 小时,$T=2t=12$ 小时,即昼夜等长。也就是说,春、秋二分全球昼夜平分。可见昼夜等长的条件是 $\phi=0°$ 或 $\delta=0°$

除了地理纬度和太阳赤纬两个主要因素外,影响昼夜长短还有一些其它因素:如太阳视半径(约16′);大气折光作用;眼高差;晨昏蒙影等。

根据半昼弧公式,我们还可以知道昼夜长短随纬度分布的规律:除赤道外,全球分极昼、昼长夜短、昼短夜长、极夜四个地带,δ 为正值,全球昼长向北递增;δ 为负值,向南递增。δ 的绝对值愈大,极昼(或极夜)范围愈大。

根据半昼弧公式,我们还可以知道昼夜长短季节变化的规律:从冬至到夏至,北半球昼长越来越长,春分前昼短夜长,春分时,昼夜等长,过了春分,北半球昼长夜短,直到夏至时,昼长最长;南半球则相反。从夏至到冬至,北半球昼越来越短,秋分前仍昼长夜短,秋分时,昼夜等长,过了秋分,北半球昼短夜长,直到冬至时,昼长最短;南半球则相反。但是不论昼夜长短如何变化,各地全年平均昼长相等,皆为12小时。

(2) 太阳高度

太阳高度($h_{\odot}$)就是太阳中心与地球中心连线和某地地平面的夹角。太阳高度大小不仅决定太阳光透过大气的厚度，也决定等量太阳辐射在地面所分布面积的大小。因此,太阳高度大小很大程度上决定地面所获得的太阳辐射能多少。任意时刻太阳高度大小可以用下式求得,该式是用球面三角形推导得出:

$$\sin h_{\odot} = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos t$$

式中 ϕ、δ、t 分别是地理纬度、太阳赤纬和太阳时角。对某一地点、某一天,ϕ、δ 可看作确定值(δ 实际上有微小变化),但太阳周日运动使得太阳时角时刻都在变化,因而太阳高度一天中也在时刻变化。从日出到地方时正午 12 时(此时太阳时角 t 为 0),太阳高度逐渐增大;从地方时正午到日落,太阳高度逐渐减小;正午太阳高度(用 $H_{\odot}$表示)是一天中最大的。为了消除太阳高度的上述周日变化，我们可以用每天的正午太阳高度作代表来比较一年中太阳高度随纬度和季节分布或变化。正午时,$t=0°$,上式中 $\cos t=1$,于是,该式变为:

$$\sin H_{\odot} = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta$$

据三角函数公式可写成:

$$\sin H_{\odot} = \cos(\phi - \delta) = \sin[90° - (\phi - \delta)]$$

进而得:

$$H_{\odot} = 90° - \phi + \delta$$

式中,ϕ 南北半球均为正值,δ 以直射半球即夏半年为正,非直射半球即冬半年为负。应用该式时,北半球 $H_{\odot}$ 以南点为起点,南半球以北点为起点。显然,该式表明,正午太阳高度因纬度而不同,因季节而变化。

分析上式,我们知道,当 $\phi = \delta$ 时,$H_{\odot} = 90°$,即太阳直射点所在的纬度,正午太阳高度为 90°,也就是说太阳位于天顶位置。由于太阳赤纬被限定在 ±23°26′ 范围内,因此,地球上只有南、北回归线(闭区间)之间,正午太阳高度才有可能达 90°,而其它地区正午太阳高度都不可能达 90°。

在讨论因纬度而不同时,为了简化和方便,可以把 δ 看作是确定值,因此上式可改写为:

$$H_{\odot} = (90° + \delta) - \phi$$

总体上看纬度 ϕ 越高,$H_{\odot}$ 越小。当然在南北回归线之间，情况有所不同:$\delta = 0°$时,赤道上 $H_{\odot} = 90°$,从赤道向两极,正午太阳高度逐渐减小;$\delta = \pm 23°26′$ 时,北(南)回归线上 $H_{\odot} = 90°$,从北(南)回归线向两极,正午太阳高度逐渐减小。在极圈内,正午太阳高度可能为负值,意味着是极夜。

在讨论因季节而变化时,为了简化和方便,可以把 ϕ 看作是确定值,因此上式可改写为:

$$H_{\odot}=(90°-\phi)+\delta$$

由于 δ 有正负区别，因此，对同一地点，正午太阳高度主要随 δ 而变化。对北半球而言，从冬至日到夏至日，δ 由负值到零到正值，正午太阳高度逐渐增大；南半球相反。从夏至日到冬至日，δ 由正值到零到负值，正午太阳高度逐渐减小；南半球相反。

（3）地球上的四季

通过前面关于昼夜长短和正午太阳高度大小的分析和讨论，我们知道，昼夜长短决定日照时间长短，日照时间长，获得太阳辐射能多，反之则少；正午太阳高度大小决定地面单位面积获得太阳辐射能多少，正午太阳高度大获得太阳辐射能多，反之则少。上述两种因素既因纬度而不同，也因季节而变化，两种因素综合迭加，导致地球表面上温度既有随纬度不同也有随时间而异。温度随时间而异这一现象，人为地将其划分成四季。有人曾错误地认为：地球处近日点前后，获得太阳辐射能多，是夏季；处远日点前后，获得太阳辐射能少，是冬季；冬、夏之间的过渡为春季和秋季。其实不然，首先，地球在近日点获得的太阳辐射能的确比在远日点多，但只多不到 7%，这微小的差别不足以形成季节变化；其次，地球在近日点或远日点是全球现象，而季节变化是半球性现象，用全球性现象来解释半球性现象显然是不能成立的。

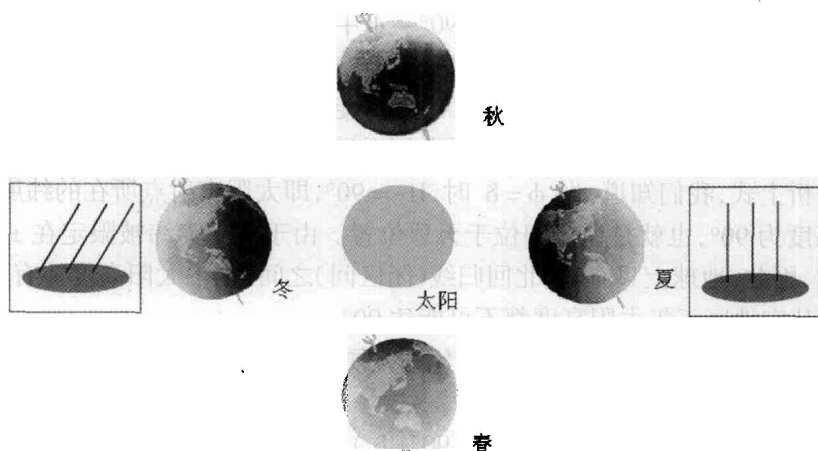



图 2-12 四季形成与变化（以北半球为例）

实际上四季的形成主要是黄道与天赤道有 23°26′的夹角所造成。由于这个角度的存在，地球侧身在轨道上绕太阳公转，因此太阳直射点就会在南北回归线之间来回移动。当太阳直射点在北回归线附近（即夏至日前后），北半球白昼时间长，正午太阳高度大，获得的太阳辐射能多，约占整个地球所获太阳辐射能的 65.5%（含远日点因素），因而温度高，此为夏季；南半球相反。当太阳直射点在南

回归线附近(即冬至日前后),北半球白昼时间短,正午太阳高度小,获得的太阳辐射能少,约占整个地球所获太阳辐射能的 30%(含近日点因素),因而温度同比较低,此为冬季;南半球相反。由夏到冬和由冬到夏的过渡季节分别为秋季和冬季。因此概括地说,黄赤交角的存在导致太阳直射点南北移动,是四季形成的原因。

因此,当太阳直射点由南回归线移经赤道到北回归线过程中,北半球白昼由最短渐渐变为最长,同时正午太阳高度也从最小渐渐变为最大(回归线之间有例外);北半球也就由冬季经春季到了夏季;南半球相反(图 2-12)。当太阳直射点由北回归线移经赤道到南回归线过程中,北半球白昼由最长渐渐变为最短,同时正午太阳高度也从最大渐渐变为最小(回归线之间有例外);北半球也就由夏季经秋季到了冬季;南半球相反。

这里所说的四季是天文学上的四季,按照气候学上季节划分标准,低纬度地带无冬季(连续 5 天平均气温低于 10℃为冬季),高纬度地带无夏季(连续 5 天平均气温高于 22℃为夏季),只有中纬度地带四季分明。

天文学上四季的划分,我国和西方国家有所不同(图 2-13):我国强调天文特征,以四立即立春、立夏、立秋、立冬为四季的起止,以二分二至为四季之中;西方国家则侧重气候季节,以二分二至作为四季的起止,以四立为四季之中。显然,这样划分的四季比我国相应季节迟一个半月。

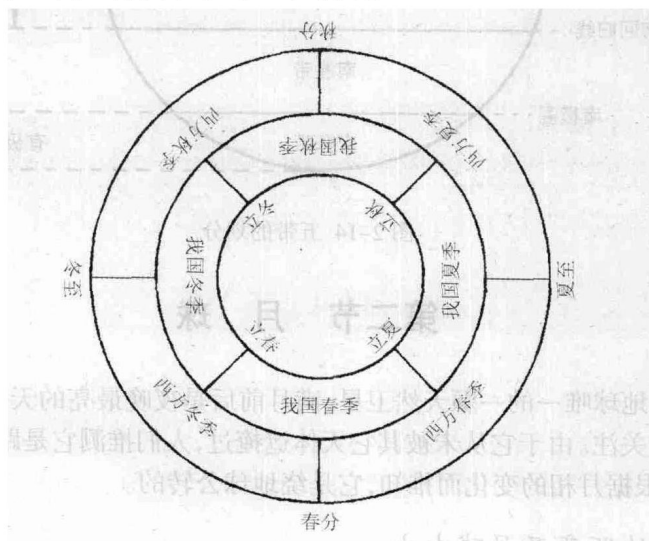



图 2-13 四季的划分

(4) 地球上的五带

地球上的五带是指热带、南温带、北温带、南寒带、北寒带。表面上看,这种划

分是以温度为标准的，但实质上是昼夜长短和正午太阳高度的综合表现。从昼夜长短来看：可以昼夜大致等长、昼夜有长有短和极昼极夜为标准；从正午太阳高度来看：可以是否有太阳直射即为 90°、是否小于或等于 0°以及在 0°和 90°之间为标准。概括出以下五带划分的标准(图 2-14)：有太阳直射的区域，即南北回归线之间为热带，这里全年昼夜大致等长、有太阳直射，因而全年温度都比较高；有极昼极夜的区域，即南北极圈以高纬度带为寒带，这里有长度不等的极昼极夜现象，正午太阳高度很小，甚至为负值，因而全年温度都比较低；既无太阳直射，又无极昼极夜现象的区域为温带，这里昼夜长短变化较大，正午太阳高度变化也较大，因而全年四季分明，全年平均温度既不很高，也不太低。上述寒带和温带位于北半球的叫北寒带、北温带，位于南半球的叫南寒带、南温带；热带跨赤道两侧，无南北之分。

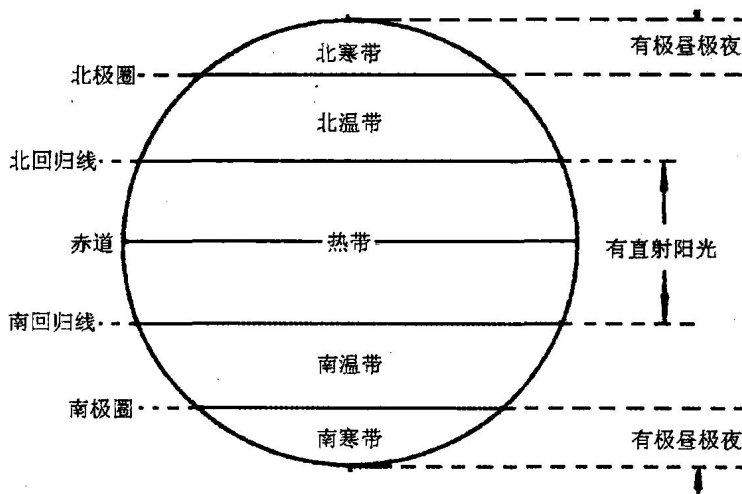



图 2-14 五带的划分

第二节 月 球

月球是地球唯一的一颗天然卫星，满月前后是夜晚最亮的天体，因而很早就受到人们的关注。由于它从未被其它天体遮掩过，人们推测它是距地球最近的天体；人们还根据月相的变化而推知，它是绕地球公转的。

一、月地距离及月球大小

月球离我们很近，这是人类早已知晓的，因为在地球上看，它不仅从未被其它天体遮掩过，还隐约可见月球上的“树”。因为近，它看上去比较大。

1. 月地距离的测定

测定月球到地球的距离,实际上我们只要测定月球地平视差就可以了,月球地平视差是指当月球(M)位于地平时,地球半径(R)对月球中心的张角 ρ_0(图2-15)。测出 ρ_0 为 57′02″,R 已知,可用正弦公式 $D=R/\sin\rho_0$ 求出月地距离。

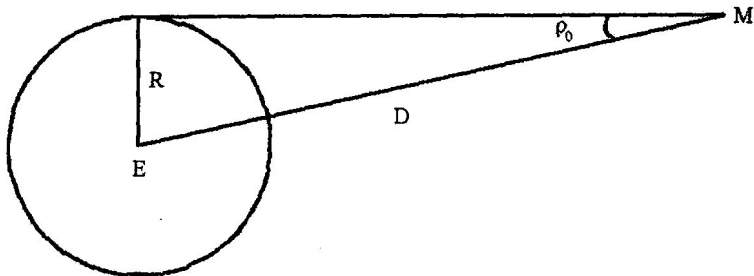



图 2-15 月球地平视差

现代测月地距离则更简单快捷,1969 年美国人在月球上安置有激光反射器,因此我们只要向激光反射器发射一束激光并记录往返的时间,就可精确测定月球的距离。

经多次测定,月地平均距离为 384 401km。

2. 月球大小

月球距地球很近,因此只要测出其视圆面直径对测角仪器(或人眼)的张角(称为视直径)即可。经精确测定月球的平均视直径(t)为 31′14″.12,则平均视半径(t′)为 15′32″.6,于是月球的线半径可用下式求得:

$$R=D\sin t'$$

式中,D 为月地距离等于 384 401km,从而求知 R=1 738km,大约是地球半径的 3/11,表面面积 $3.976\times10^7\text{km}^2$,赤道直径 3 476.2km,两极直径 3 472.0km,扁率 0.0012 ,体积为 $2.199\times10^{10}\text{km}^3$,平均密度是水的 3.35 倍,月球的质量为 $7.349\times10^{22}\text{kg}$。

二、月球表面形态、物理状况与结构

人类想象像中的月球表面各种状况和地球上一样, 但经过长期科学探测发现,月球表面和我们的地球有很大差异。

1. 月球表面形态

和地球表面相类似的是,月球表面有月海、月陆、山脉、环形山和月谷,还有辐射纹(图 2-16)。与地球上的海不同,月海中并没有水,只是相对较低、类似地球上的盆地的大片区域,是广阔的平原。已确定的月海有 22 个,绝大多数分布在月球正面(即朝向地球的一面)。有 3 个在背面,4 个在边缘地区。在正面的月海

面积略大于50%,其中最大的“风暴洋”面积约5 000 000km²。由于对太阳辐射的反射率较低,因而我们看上去较为灰暗。月陆则是高出月海的大片区域,由于对太阳辐射的反射率比月海大,因而我们看上去比月海明亮些。在月球正面,月陆的面积大致与月海相等,但在月球背面,月陆的面积要比月海大得多。月面上最显著的特征是有众多的环形山,也叫月坑,是一种四周凸起、中部低凹的环形隆起,几乎布满了整个月面。最大的环形山是南极附近的贝利环形山,直径295km,比海南岛还大一点。小的环形山甚至可能是一个几十厘米的凹坑。直径不小于1 000m的大约有33 000个,占月球表面积的7%～10%。月球上的山脉十分壮观,山脉上也有高山峻岭,山脉高度往往高出月海三四千米,最高的山峰甚至高达8 000m和9 000m。据统计,月面上6 000m以上的山峰有6个,5 000～6 000m有20个,4 000～5 000m则有80个,1 000m以上的有200个。最长的山脉可绵延1 000km。月球上的山脉常借用地球上的山脉名,如阿尔卑斯山脉、高加索山脉等等。月谷是月面上那些看来弯弯曲曲的黑色大裂缝,和地球上有着许多著名的裂谷相类似,它们有的绵延几百到上千千米,宽度从几千米到几十千米不等。那些较宽的月谷大多出现在月陆上较平坦的地区,而那些较窄、较小的月谷则到处都有。辐射纹是月面上一种以环形山为辐射点向四面八方延伸的亮带,它几乎以笔直的方向穿过山系、月海和环形山。辐射纹长度和亮度不一,最引人注目的是第谷环形山的辐射纹,最长的一条长1 800km,满月时尤为壮观。其次,哥白尼和开普勒两个环形山也有相当美丽的辐射纹。据统计,有50个环形山具有辐射纹。辐射纹很可能是陨星撞击或火山爆发所造成。

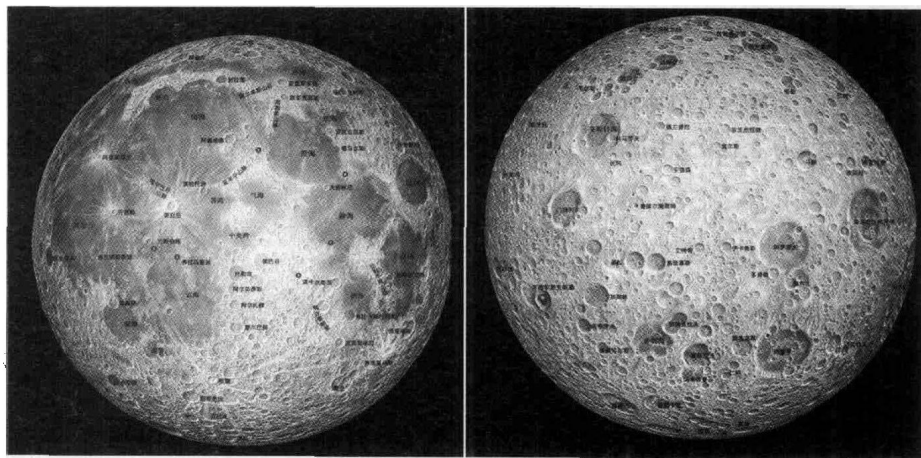



图2-16 月球的表面形态(左:正面,右:背面)

2. 月面的物理状况

由于体积和质量都比地球小得多,因而月面的重力加速度也很小,只有地

面的六分之一，赤道处为 1.62 m/s²，逃逸速度为 2.38km/s，这样的重力无法保持住大气，所以月球上没有大气，也就没有汽态水，当然也就没有液态水。月面的昼夜温差很大，达数百摄氏度。由上可见，月面没有生命存在的必要条件，月球上应该不会有类似于地球上的生命现象，飞船登月实地考察，确未发现有生命现象。另外，登月考察还确认，月球表面覆盖一层月尘和岩屑；月震很弱；也没有明显的磁场。

3. 结 构

月球的内部结构与地球相似，有壳、幔、核等分层结构。最外层的月壳平均厚度约为 60～65km。月壳下面到 1 000km 深度是月幔，它占了月球的大部分体积；它和月壳组成刚性的岩石圈。月幔下面是月核，月核的温度约为 1 000℃，很可能是熔融状态的软流核。

三、探月历程

1957 年 10 月 4 日，原苏联“卫星 1 号”人造卫星发射成功，开创了人类空间探测的新纪元。地球唯一的天然卫星——月球是离我们最近的天体，古今中外有过许多登月的传说，在中国有“嫦娥奔月”，在国外有《梦游记》等。1959 年 1 月 2 日苏联发射了“月球 1 号”探测卫星，1959 年 9 月 14 日“月球 2 号”首次撞击月球表面，同年 10 月发射的“月球 3 号”飞越月球背面，首次拍摄到月球背面照片（图 2-16 右）；1966 年 1 月发射的“月球 9 号”在月球表面软着陆，1966 年 3 月发射的 “月球 10 号” 成为人造月球卫星；1969 年 7 月至 1976 年 8 月陆续发射的“月球 15 号”至“月球 24 号”发展为自动月球科学站，或就地考察（17 号和 18 号带有月球车）获得并发回大量资料，或将月球土壤和岩石标本送回地球。苏联同时于 1965 年至 1970 年发射一系列“探测号”行星际飞行器，其中 5 至 8 号进行月球探测后返回地球。

美国的阿波罗探月把人类久远的梦想变为现实，把人类探月推向辉煌。经过多次试验和失败，阿波罗 11 号飞船所载登月舱终于于 1969 年 7 月 20 日（UT）在月面着陆。11 号指令长阿姆斯特朗一只脚踏上月球时，说“That's one small step for a man, one giant leap for mankind.”。到 1972 年 12 月 11 日（UT）共有六批 12 名宇航员成功登月（表 2-2）。此后有二十多年没有任何国家再发射月球探测器。直到 1994 年 1 月，美国发射了“克莱门汀”月球探测器，经对探测数据研究，月球南极环形山的底部可能存在水冰。1998 年 1 月 7 日，美国又发射“月球勘测者”探测器，根据探测资料和绘制的全月面地形图、化学成分分布图，月球不仅在南北两极有大约 66 亿吨与石头、泥土混合在一起的水冰，月面各处还富含锝、钛、钍、铀等矿产资源。

表 2-2 阿波罗 6 次登月相关数据

阿波罗系列	发射时间（UT）	登陆时间（UT）	登陆位置	探测时间（小时）	行程（km）	携回样品（kg）	溅落时间（UT）
11	1969.07.16 13:32:00	1969.07.20 20:17:40	0.674N 23.473E	2.53	0.25	21.7	1969.07.24 16:50:35
12	1969.11.14 16:22:00	1969.11.19 06:54:35	3.014S 23.419W	7.75	1.35	34.4	1969.11.24 20:58:34
14	1971.01.31 21:03:02	1971.02.05 09:18:11	3.645S 17.471W	9.38	3.45	42.9	1971.02.09 21:05:00
15	1971.07.26 13:34:00	1971.07.30 22:16:29	26.132N 3.634E	19.13	27.9	76.8	1971.08.07 20:45:53
16	1972.04.16 17:54:00	1972.04.21 02:23:35	8.973S 15.499E	20.23	27.0	94.7	1972.04.27 19:45:05
17	1972.12.07 05:33:00	1972.12.11 19:54:57	20.188N 30.775E	22.07	35.0	110.5	1972.12.19 19:24:59

进入 21 世纪，世界掀起新一轮月球探测热潮。欧盟率先于 2003 年 9 月 28 日，发射了“小型先进技术研究任务”(SMART-1)月球探测器，经过 13 个月的飞行之后，SMART-1(多译为“智慧 1 号”)于 2004 年 11 月 15 日成功抵近月球，并进入椭圆形月球轨道环绕月球飞行。SMART-1 上携带了多种仪器，包括相机和分光仪。它们将以前所未有的精度来研究月球的地形、地貌和矿物学特征，同时还会搜寻隐藏于月球南极的水冰。SMART-1 将解释许多悬而未决的科学问题，例如月球的形成、月球的矿物成分以及水的存在与否和数量。这些数据将帮助科学家更好地认识“地 - 月”系统以及类地行星，也将为人类在月球上长期居住提供大量有价值的信息。SMART-1 还有一项重要任务，那就是在太空中试验太阳能离子发动机推进系统和深空飞行所需的其它创新和关键技术，为未来的行星探测任务铺平道路。SMART-1 月球探测器已于 2006 年 9 月 3 日以大约 7 000km 的时速撞向月球。

随后跟进的是日本，1999 年日本推出“月亮女神”探月计划，2007 年 9 月 14 日上午 9 点 31 分(北京时间)，日本探月卫星“月亮女神”号发射升空，主要任务是观测月球表面地形、研究元素分布等。日本研究人员称，这是日本 2025 年建立载人太空站第一步。

中国的探月计划于 2004 年 1 月正式立项，被称作“嫦娥工程”。北京时间 2007 年 10 月 24 日 18 时 05 分，“嫦娥一号”探测器(图 2-17)从西昌卫星发射中心成功发射。我国首次月球探测工程有四大科学任务：一是获取月球表面三维立体影像，精细划分月球表面的基本构造和地貌单元，进行月球表面撞击坑形态、大小、分布、密度等的研究，为类地行星表面年龄的划分和早期演化历史研究提供基本数据，并为月面软着陆区选址和月球基地位置优选提供基础资料等。二是

分析月球表面有用元素含量和物质类型的分布特点，主要是勘察月球表面有开发利用价值的钛、铁等 14 种元素的含量和分布，绘制各元素的全月球分布图，月球岩石、矿物和地质学专题图等，发现各元素在月表的富集区，评估月球矿产资源的开发利用前景等。三是探测月壤厚度，即利用微波辐射技术，获取月球表面月壤的厚度数据，从而得到月球表面年龄及其分布，并在此基础上，估算核聚变发电燃料氦 -3 的含量、资源分布及资源量等。四是探测地球至月球的空间环境。月球与地球平均距离为 38 万多千米，处于地球磁场空间的远磁尾区域，卫星在此区域可探测太阳宇宙线高能粒子和太阳风等离子体，研究太阳风和月球以及地球磁场磁尾与月球的相互作用。卫星发射后，2007 年 11 月 26 日中国国家航天局正式公布嫦娥一号卫星传回的第一幅月面图像(图 2-18)。这幅月面图像位于月表东经 57°到东经 83°，南纬 54°到南纬 70°。图幅宽约 280km，长约 460km。

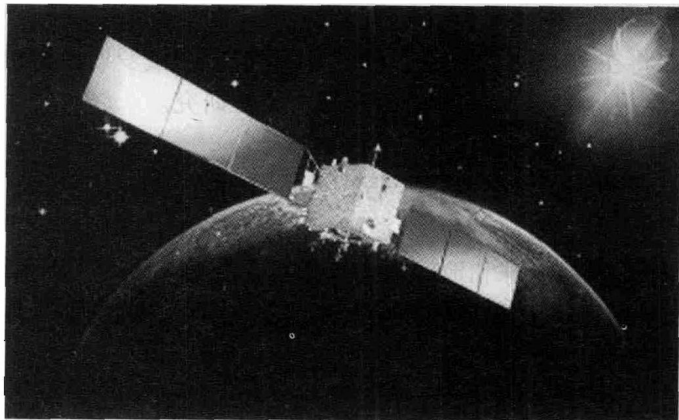



图 2-17 嫦娥一号探月卫星(模拟)

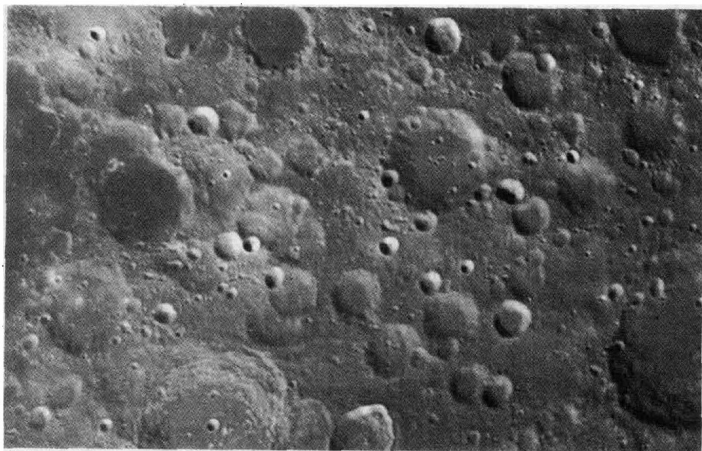



图 2-18 我国嫦娥 1 号发回的月球表面照片(局部)

我国探月工程分为3个阶段,概括为三个字即"绕"、"落"、"回"。2007年10月24日发射的"嫦娥一号"是第一期,主要是在"绕"月球飞行过程中工作;第二期工程时间定为2007年至2010年,目标是研制和发射航天器,以软着陆的方式降"落"在月球上进行探测。具体方案是用安全降落在月面上的巡视车(已建成数种概念车型)、自动机器人探测着陆区岩石与矿物成分,测定着陆点的热流和周围环境,进行高分辨率摄影和月岩的现场探测或采样分析,为以后建立月球基地的选址提供月面的化学与物理参数。第三期工程时间定在2011至2020年,目标是月面巡视勘察与采样返"回"。前期主要是研制和发射新型软着陆月球巡视车,对着陆区进行巡视勘察;后期即2015年以后,研制和发射小型采样返回舱、月表钻岩机、月表采样器、机器人操作臂等,采集关键性样品返回地球。对着陆区进行考察,为下一步载人登月探测、建立月球前哨站的选址提供数据资料。此段工程的结束将使我国航天技术迈上一个新的台阶。

美国宣布将在2015年之前在月球建立观测基地;俄罗斯也做出新的探测月球计划;有消息报导,印度也在积极开展探月工程研究。

第三节　地月系

月球绕地球公转,月球和地球构成一个互有引力作用的天体系统,即地—月系。这个系统的中心天体是地球。在太阳系中,还有,一些类似于地—月系的行星—卫星系统。

一、月球的公转和自转

月球随地球一道绕太阳公转的同时,月球还有它自身的复杂运动,这些运动中最重要的是月球绕地球公转和它绕自身旋转轴线的自转。

1. 月球的公转

月球和地球是互有引力作用的两个天体,按照力学理论,它们应该绕着它们的共同质量中心即共同质心旋转。但是,由于地球的质量巨大,月球的质量要小得多(只有地球质量1/81),它们的共同质心十分接近地球的质心,在距地心4 671km处,或者说在地表下1700km处。因此,我们通常粗略地把这种运动看作是月球绕地球的运动,称之为月球的公转。月球公转的方向是自西向东,与地球绕日公转方向相同。

月球绕地球的公转轨道是一个椭圆,地球位于这个椭圆的一个焦点上,平均轨道半径384 401km。月球轨道偏心率为0.0549,近地点距离为363 300km时我们看月球,月球视半径为16′46″;远地点距离为405 500km时我们看月球,月球

视半径为 14′41″。也就是说,月球在公转轨道上,其视半径在 14′41″和 16′46″之间持续变化着,其公转轨道倾角在 28.58°与 18.28°之间变化。

月球公转轨道所在平面与天球的交线叫做白道,白道与黄道有 5°09′的倾角,叫黄白交角。白道与天赤道的夹角为 28°35′(23°26′+5°09′),月球中心和地球中心连线与地球表面的交点,最大可达南北纬 28°35′。

月球的公转周期定义为 1 个"月",但参考点不同,"月"的名称和长度也不相同。恒星月(以恒星为参考点)是月球视圆面中心连续两次经过同一恒星(无明显自行)的时间间隔,也就是月球绕地球公转 360°所需的时间,它是月球绕地球公转的真正周期,长度为 27.3217 日。近点月(以近地点为参考点)是月球中心连续两次经过近地点的时间间隔,长度为 27.5546 日。交点月(以黄白交点之一为参考点)是月球视圆面中心连续两次经过同一黄白交点的时间间隔,长度为 27.2122 日。朔望月(以太阳为参考点)是连续两次新月即朔(或满月即望)之间的时间间隔,长度为 29.5306 日,它是月球同太阳的会合周期,是月球盈亏即圆缺变化的周期。显然朔望月比恒星月约长 2.2 日,这是因为,由于地球绕日公转导致太阳视位置相对于恒星也有自西向东的视运动(图 2-19)。

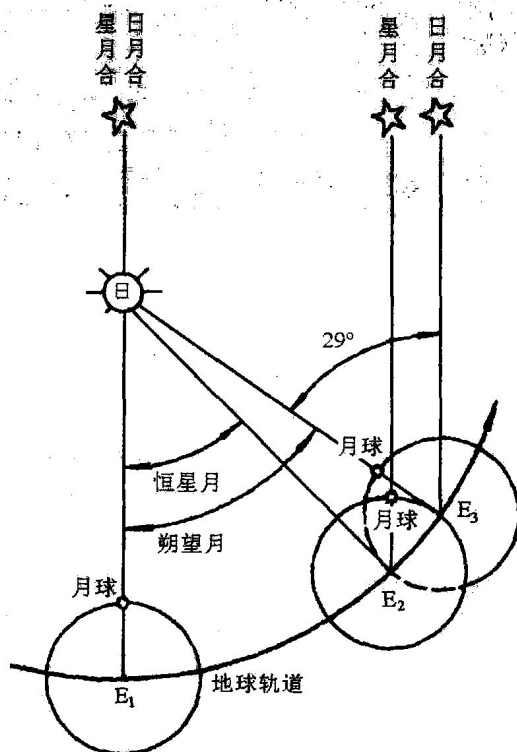



图 2-19 恒星月与朔望月的比较

月球公转速度有角速度和线速度之分，公转平均角速度可由公转周期求得，即360°除以27.3217日，为13°10′/日。由于月球公转轨道是个椭圆，所以公转角速度是不均的，近地点最快，约为15°/日；远地点最慢，约为11°/日。

公转线速度因月球到地球的距离变化而不同，平均线速度为1.023km/s。

2. 月球的自转

月球除了公转还有自转，月球自转与其公转同步，即方向相同，自西向东，周期相等，为27.3217日，因此称同步自转。这样一来，月球大体上总是以同一个侧面朝向地球，因而我们在地球上只能看到大体相同的半个月面。相反站在月球的正面，月地处于合适的位置，地球总是又大又亮地出现在天空一隅(图2-20)。

图2-20 在月球上看地球

二、月　相

月相是指月球不同的视形状，也就是月球亮面积(即圆缺变化)大小的表现。我们知道，月球本身不发光，因反射太阳光而被我们看到，但是月球被太阳照亮的部分(即月球上的白天)总是朝向太阳，月球又是绕地球公转的，因此我们所能见到的亮面积大小就会发生变化，这就是月相变化。月相变化与日、月、地三者相对位置有关，取决于太阳光线照射月球的方向和我们观测月球的视线方向（图2-21)。当光线和视线方向相同，即月球黄经与太阳黄经相差180°时，月球被照亮的半球能全被我们看到，月相表现为满月，称为"望"；当光线和视线方向相反，即月球黄经与太阳黄经相同时，月球被照亮的半球背向我们，我们完全看不到，月相表现为新月，称为"朔"；当光线和视线方向相垂直，即月球黄经与太阳黄经相差90°或270°时，月球被照亮的半球只有一半朝向我们，我们也只能看到一半，月相表现为"上弦月"和"下弦月"，前者右(西)边亮，后者左(东)边亮。

月相变化周期即由新月（或满月）到下一次新月（或满月）的时间为 29.5306 日，或 29 日 12 时 44 分 03 秒，显然这就是连续两次朔（或望）之间的时间间隔，因而称之为朔望月。

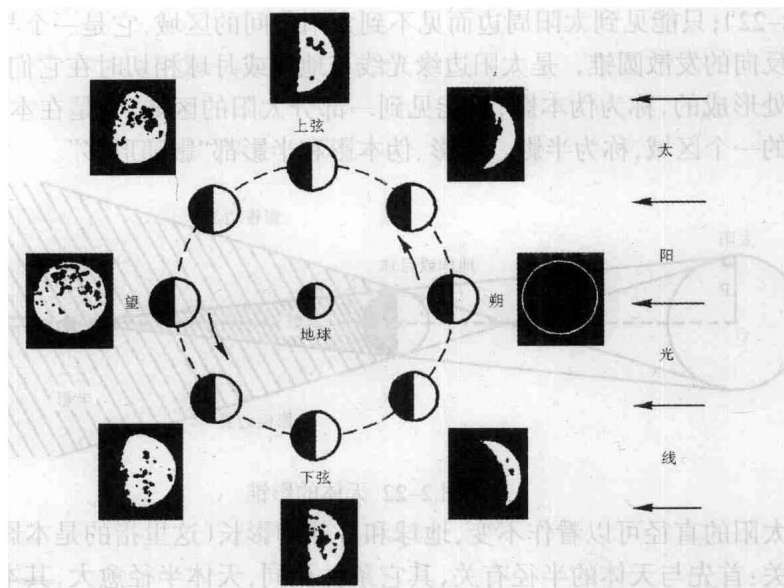



图 2-21 月相成因及变化

不同月相出、没及中天时刻不同（表 2-3），这是因为月球每天自西向东运行 13°10′，地球每小时自西向东自转 15°，地球自转 13°10′约需 52 分钟，所以月球每天出没地平的时间平均向后延迟 52 分钟，这就是我们日常所见明月当空逐日的道理。

表 2-3 不同月相时月球出没及中天的大致时刻

月相	距角	与太阳出没比较	月出	中天	月落	见月时间
新月	0°	同升同落	清晨	正午	黄昏	彻夜无月
满月	180°	此起彼落	黄昏	半夜	清晨	通宵见月
上弦月	90°	迟升后落	正午	黄昏	半夜	上半夜西天
下弦月	270°	早升先落	半夜	清晨	正午	下半夜东天

三、日食和月食

1. 天体的影锥

任何物体在太阳光照射下都会留下阴影。月球和地球也不例外，在太阳光下，地球和月球在背向太阳一侧方向会形成一条长长的影子；假若太阳是点光源，月影或地影就很简单，影内照射不到阳光，人在影内也就见不到太阳。但是太

阳是一个球形光源，且其半径远远大于地球和月球，因此，太阳光下地球和月球的影子可分三区域：完全见不到阳光的区域，它是一个以顶端背向太阳的会聚圆锥，是太阳边缘光线与地球或月球相切时在它们的背太阳一侧形成的，称作本影（图 2-22）；只能见到太阳周边而见不到太阳中间的区域，它是一个与本影同轴，但呈反向的发散圆锥，是太阳边缘光线与地球或月球相切时在它们的背太阳一侧远处形成的，称为伪本影；只能见到一部分太阳的区域，它是在本影和伪本影四周的一个区域，称为半影。本影、伪本影和半影都“影随形移”。

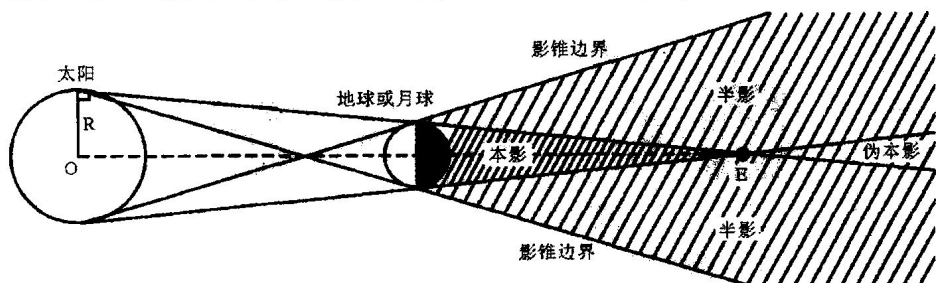



图 2-22 天体的影锥

太阳的直径可以看作不变，地球和月球的影长（这里指的是本影）与下列因素有关：首先与天体的半径有关，其它条件相同，天体半径愈大，其本影锥愈长；显然，月、地到太阳等距离时，地球本影更长；其次与天体到太阳的距离有关，距离愈近本影愈短，距离愈远本影愈长。就地球而言，其公转轨道是椭圆，在公转过程中，它到太阳的距离时刻在变化，因此，本影的长度也时刻在变化，在近日点时本影最短，而在远日点时本影最长。据计算地球本影平均长度为 1 377 000km，远远大于月地平均距离（384 401km）。就月球而言，其绕地公转轨道也是椭圆，在公转过程中，它不仅到地球的距离有变化，它到太阳的距离变化更大，在朔（即新月）时，本影较短，平均长度为 374 500km，小于月地平均距离。可见，月球本影有时影锥尖端或半影可达地球，有时只有伪本影或半影才能到达地球；在望（满月）时，本影较长，但位于地球背向太阳一侧，影锥对地球没有什么影响。

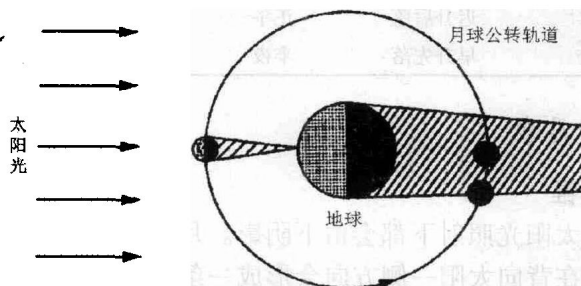



图 2-23 日月食的形成

2. 日食月食及其形成

日食是月球绕地球公转到太阳和地球中间时，如果太阳、月球、地球三者正好排成或接近一条直线，月球的影子投在地球上，在地球上月球影子中的观测者所见到的月球挡住太阳的现象。

月食是月球绕地球公转到地球的阴影部分时，在地球的夜半球，观测者所见到的天文现象。这时太阳光被地球所遮挡，本来应该看到的满月却只能看到一部分或完全看不到。

3. 日食月食种类

日食有三种，日全食是月球本影笼罩的地面观测者所见到的天文现象（图2-24），此时，日轮完全被月轮所遮挡；日环食是月球伪本影笼罩的地面观测者所见到的天文现象，此时，日轮中间区域被月轮所遮挡，但太阳边缘仍能看到；日全食和日环食又叫中心食；日偏食是月球半影笼罩的地面观测者所见到的天文现象，及日全食和日环食前后相伴出现的现象。

月食只有两种，月全食是月球全部隐入地球本影的现象，应该是满月却因无太阳光反射而无法见到；月偏食是月球部分进入地球本影的现象，在月全食前后也相伴月偏食出现；月食中无月环食，这是因为月球绕地公转轨道处的地球本影垂直截面直径远远大于月球的直径。月球进入地球半影时称为半影食，这时虽然月轮的亮度大大降低，但整个月轮仍然可见，因此天文台一般不作专门预报。

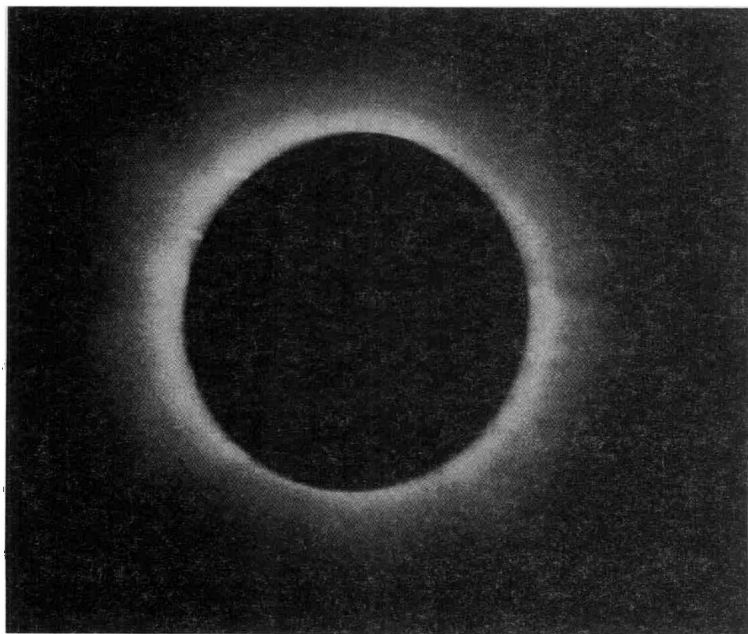



图 2-24 日全食

4. 日食月食过程

日食过程：除了日、月每天有自东向西的周日视运动外，太阳每天还有自西向东的视运动，平均角速度每天约59′；月球同样每天也有自西向东的视运动，平均角速度为每天13°10′，显然，月球的速度比太阳快，因此，日食过程就是月轮在天球上自西向东赶上、掩蔽并超过日轮的过程。可见日食过程总是从太阳的西边开始，在太阳的东边结束。

日全(环)食要经过三个阶段五个食相：三个阶段是偏食、全(环)食和偏食；五个食相是初亏—食既—食甚—生光—复圆(图2–25)。当月轮东缘与日轮西缘相外切时称为初亏，此时日食开始，但是日偏食；当月轮东缘与日轮东缘相内切时称为食既，此时日全食开始；当月轮中心与日轮中心最接近或重合的瞬间，称作食甚；当月轮西缘与日轮西缘相内切时称为生光，此时日全食结束，日偏食将现；当月轮西缘与日轮东缘相外切时称为复圆，此时日偏食结束，也就是日全食结束。

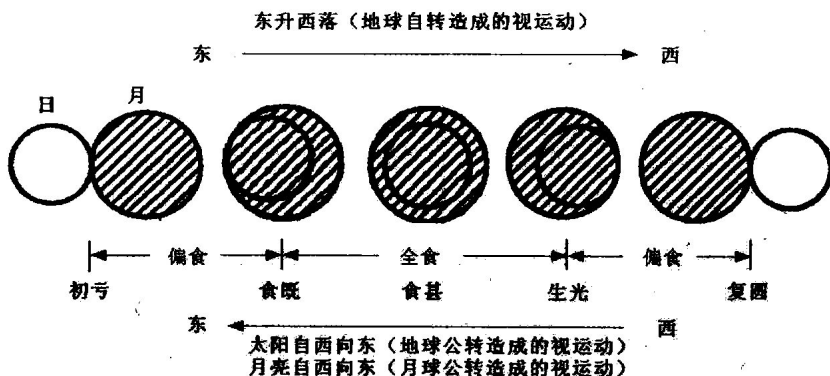



图2–25 日全食过程

日偏食只有初亏、食甚和复圆，无食既与生光(图2–26)。

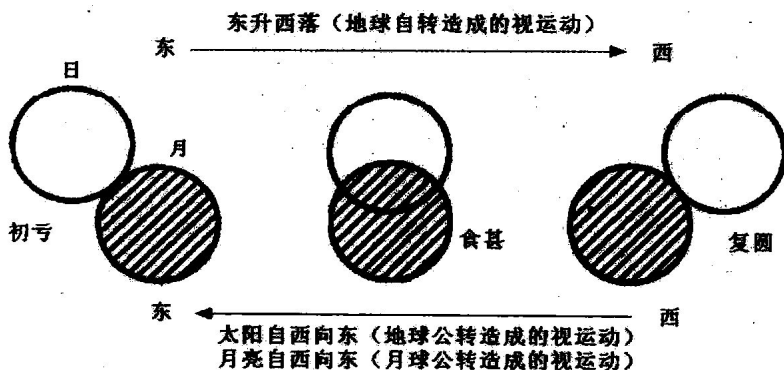



图2–26 日偏食过程

食甚时,日轮(视直径作为1)被月轮遮蔽的程度叫食分。日偏食和日环食的食分小于1,日全食的食分大于或等于1。

月食过程:我们知道,地球以每天约59′的角速度自西向东运动,地球的本影也以同样的角速度和方向随地球而移动;月球则以每天13°10′的角速度自西向东绕地球公转,显然,月球的速度比地球快,因此,月食过程就是月轮自西向东赶上、进入并超过地球本影的过程。可见月食过程总是从月球的东边开始,在月球的西边结束。

月全食也要经过三个阶段五个食相:三个阶段是偏食、全食和偏食;五个食相是初亏—食既—食甚—生光—复圆(图2–27)。当月轮东缘与地球本影西缘相外切时称为初亏,此时月食开始,但是月偏食;当月轮西缘与地球本影西缘相内切时称为食既,此时月全食开始;当月轮中心与地球本影截面中心最接近或重合的瞬间,称作食甚;当月轮东缘与地球本影东缘相内切时称为生光,此时月全食结束,月偏食将现;当月轮西缘与地球本影东缘相外切时称为复圆,此时月偏食结束,也就是月全食结束。

月偏食也只有初亏、食甚和复圆,无食既与生光。

食甚时,月轮(视直径作为1)进入地球本影部分与月球视直径之比叫食分。月全食食分大于或等于1:食甚时如月轮正好与地球本影内切,食分等于1;食甚时如月轮不与地球本影内切,食分大于1。月偏食的食分小于1。

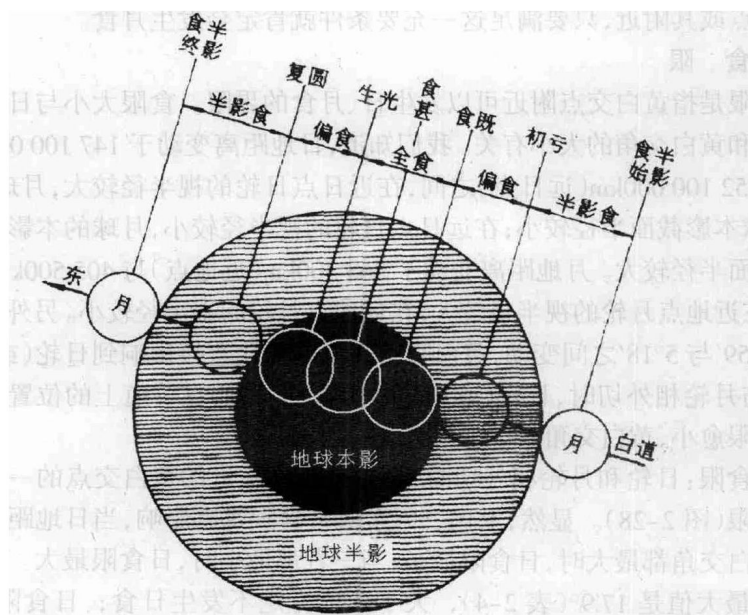



图2–27 月全食过程

5. 日、月食的条件

日食和月食时有发生，但并不是每月都会发生，可见日、月食发生需满足一定条件。

日食条件：通过前面介绍，我们知道日食必发生在朔，但每个朔望月都有朔，我们并没有月月看到日食，可见逢朔未必有日食，这是因为黄道和白道有 5°09′的夹角，有时逢朔时，日、月、地在一个平面内，但却不在一直线或接近一直线上，月影不能投到地球上，也就不会发生日食。因此，日食必发生在朔只是必要条件，那么还需具备什么条件才肯定发生日食呢？这个条件是：逢朔时，太阳应位于或靠近黄白交点，这个条件可看作是充分条件。上述两条件都具备了就是发生日食的充要条件，即：日、月相合于黄白交点或其附近，只要满足这一充要条件就肯定会发生日食。

月食条件：同样，通过前面介绍，我们知道月食必发生在望，但每个朔望月都有望，我们并没有月月看到月食，可见逢望未必有月食，这同样是因为黄道和白道有 5°09′的夹角，有时逢望时，日、地、月在一个平面内但却不在一直线或接近一直线上，月球只从地球本影外的上方或下方穿过，不能进入地球本影，也就不会发生月食。因此，月食必发生在望只是必要条件，那么还需具备什么条件才肯定发生月食呢？这个条件是：逢望时，太阳应位于或靠近黄白交点，这个条件可看作是充分条件。上述两条件都具备了就是发生月食的充要条件，即：日、月相冲于黄白交点或其附近，只要满足这一充要条件就肯定会发生月食。

6. 食　限

食限是指黄白交点附近可以发生日、月食的界限。食限大小与日地距离、月地距离和黄白交角的大小有关。我们知道，日地距离变动于 147 100 000km（近日点）与 152 100 000km（远日点）之间，在近日点日轮的视半径较大，月球的本影较短，地球本影截面半径较小；在远日点日轮的视半径较小，月球的本影较长，地球本影截面半径较大。月地距离变动于 363 300km（近地点）与 405 500km（远地点）之间，在近地点月轮的视半径较大，在远地点月轮的视半径较小。另外，黄白交角也在 4°59′与 5°18′之间变动，黄白交角大小的变化直接影响到日轮（或地球本影截面）与月轮相外切时，日轮（或地球本影截面）中心在黄道上的位置，黄白交角愈大食限愈小，黄白交角愈小食限愈大。

日食限：日轮和月轮相外切时，日轮中心到最近的黄白交点的一段黄经差，叫日食限（图 2–28）。显然，上述三因素对日食限都有影响，当日地距离、月地距离和黄白交角都最大时，日食限最小；当三者都最小时，日食限最大。根据计算，日食限最大值是 17.9°（表 2–4），大于此值肯定不发生日食；日食限最小值是 15.9°，小于此值肯定发生日食；在 17.9°和 15.9°之间有可能发生日食。

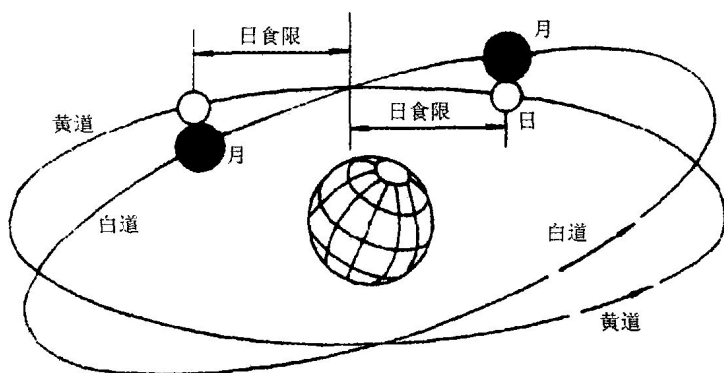



图 2-28 日食限

月食限:地球本影截面与月轮相外切时,地球本影截面中心到最近黄白交点的一段黄经差,叫月食限。日地距离、月地距离和黄白交角的大小对月食限也有影响,月地距离大、黄白交角大都使月食限减小,日地距离大时,因使地球本影截面增大,致使月食限增大。根据计算,月食限(这里不考虑半影食)最大值是11.9°,大于此值肯定不发生月食;月食限最小值是10.1°,小于此值肯定发生月食;在11.9°和10.1°之间有可能发生月食。

表 2-4 日食限和月食限的大小

食的类型	日食限		月食限		
	偏食	中心食	半影食	偏食	全食
最大值	17°.9	11°.5	18°.3	11°.9	6°.0
最小值	15°.9	10°.1	16°.2	10°.1	4°.1

由上可见,在不考虑半影食时,日食限大于月食限,这就意味着日食出现的机率比月食大。

7. 食　季

食季是有可能发生日、月食的一段时间。实际上也是太阳经过食限的一段时间。由于黄道和白道有两个交点,因此,大体上说,一年有两个食季,相隔约半年。食季长短取决于食限,食限愈大,食季愈长。根据食限大小和太阳周年运动的速度(59′/日),可以推算食季的大致日数。我们知道日食限的最大值和最小值,就可算出相应的日食季:

$$最大值:17.9° \div 59' \times 2 = 36.4 天$$

$$最小值:15.9° \div 59' \times 2 = 32.2 天$$

这就是说日轮在食限内运行的时间最长可达36.4天,最短也得32.2天;由于朔望月的长度为29.5306天,小于32.2天;因此,在32.2天内,至少有一次日、月相合,从而发生日食。一年有两个食季,也就是说,一年至少发生两次日食。十

分巧合时一年可发生 5 次日食(表 2–5)。

表 2–5 1935 年发生的日食和月食

发生日期	1 月 5 日	1 月 19 日	2 月 3 日	6 月 30 日	7 月 16 日	7 月 30 日	12 月 25 日
食的类型	日偏食	月全食	日偏食	日偏食	月全食	日偏食	日环食

同样,我们知道月食限的最大值和最小值,就可算出相应的月食季:

最大值:$11.9° \div 59' \times 2 = 24.2$ 天

最小值:$10.1° \div 59' \times 2 = 20.5$ 天

这就是说地球本影截面在食限内运行的时间最长可达 24.2 天,最短为 20.5 天;由于朔望月的长度远大于 20.5 天;因此,在 20.5 天内,日、月并不一定会相冲,也就不一定会发生月食。十分不巧时,一年中可能 1 次月食也不会发生。

由上可见,一年中,就全球而论,发生日食的次数比月食多,最多一年可发生 7 次食(表 2–5),可能是 5 次日食 2 次月食或 4 次日食 3 次月食,最少只发生 2 次食,全部是日食。对一地而言,见到月食的次数远多于日食,这是因为日食的见食范围小(食带宽仅几百千米),见食时间短(只有几十分钟,中心食只有几分钟);而月食的见食范围广,大半个地球上均可见,见食时间长,可达数小时。

8. 日、月食的周期

日、月食形成条件决定日、月食具有周期现象。由于地球绕日公转和月球绕地公转都是周期性运动,黄白交点的变化及月球过近地点时间也具有周期性变化,因此日、月食周期与以下四周期有关,即它们的最小公倍数就是日、月食的周期,即沙罗周期:

朔望月:29.5306 日 $\times 223 = 6585.32$ 日

交点月:27.2122 日 $\times 242 = 6585.35$ 日

近点月:27.5546 日 $\times 239 = 6585.55$ 日

交点年(食年):346.6200 日 $\times 19 = 6585.78$ 日

沙罗周期的长度是 6585.32 日,约等于 18 个平年外加 15.32 日,18 个平年中应该有 4 ~ 5 个闰年,因此,一个沙罗周期相当于 18 年 10.32 日(5 个闰年)或 18 年 11.32 日(4 个闰年)。每个沙罗周期内,不仅日、月食的种类和次数大体相同,出现日、月食种类的次序也大体相同,也就是说每次日食和月食,经过一个沙罗周期又会重复出现,但并不出现在同一地点和同一时刻。

四、海洋天文潮汐

在海边的人都知道,海水水位不是固定的,而是随时间变化有高有低,并且水位的高低变化有一定周期性,我国古代人把午前海水上涨称之为潮,午后海水

上涨称之为汐，以上合称为潮汐。从现在来看，这种潮汐现象不仅存在于海洋，也存在于地壳（称为固体潮）、大气（称为大气潮）和生物（称为生物潮），只是海洋潮汐最明显、最壮观。它们应该由共同的原因所形成。

我国古代人对海洋潮汐就有较深刻的认识。汉代王充在《论衡》一书中指出，“涛之起也，随月盛衰”，宋代燕肃指出它“随日而应月”、“盈于朔望”、“虚于上下弦”，宋代余靖指出，它是波动现象。可见海洋潮汐与日、月有关且有周期性。17 世纪英国牛顿提出万有引力定律，从此确认了日、月引潮力是产生潮汐的主要原因。

1. 日月引力与引潮力

太阳和月球对地球都有引力作用。我们知道，引力大小与物体质量成正比，与物体间距离平方成反比。因此太阳和月球对地球单位质量的平均引力就是对地球球心单位质量的引力，即 $f=Gm/d^2$，对于太阳，式中 m、d 分别是太阳质量和日地距离，对于月球，式中 m、d 分别是月球质量和月地距离。但是，地球是一个半径为 6371km 的球体，太阳或月球对地球表面的实际引力与对地心的引力（即平均引力）之间有一定的差值，这个差值是地球发生潮汐的直接原因，称为引潮力。下面根据万有引力定律来推导出引潮力的大小、影响因素和分布。

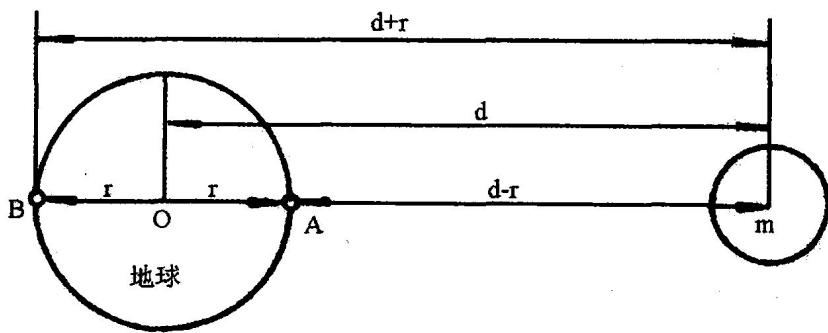



图 2-29 月球对地球的差别吸引

如图 2-29，月球 m 对地心单位质量的引力即平均引力为：

$$F_0=Gm/d^2$$（m 是月球的质量，d 是月地距离）

月球 m 对正垂点（地球中心与月球或太阳中心连线和地面的交点）A 单位质量的引力为：

$$F_A=Gm/(d-r)^2$$（在正、反垂点，r 等于地球的半径）

月球 m 对反垂点（月球中心与地球中心连线延长后和地面的交点）B 单位质量的引力为：

$$F_B=Gm/(d+r)^2$$

显然，正垂点 A 的引潮力为：

$$\Delta F_A = F_A - F_O = Gm/(d-r)^2 - Gm/d^2 = Gm/d^2\left[\frac{1}{(1-r/d)^2} - 1\right]$$

$$= Gm/d^2\left[\frac{1}{1-2r/d+(r/d)^2} - 1\right] \text{（忽略高阶小数} \frac{r^2}{d^2}\text{）}$$

$$= Gm/d^2\left[\frac{1+2r/d}{1-(2r/d)^2} - 1\right] \text{（忽略高阶小数 } 4\frac{r^2}{d^2}\text{）}$$

从而得正垂点 A 的引潮力公式为：

$$\Delta F_A = +2Gmr/d^3$$

同样，我们可以求得反垂点 B 的引潮力公式为：

$$\Delta F_B = -2Gmr/d^3$$

因为 G、m、r、d 都是常数或已知数，通过上面两式，我们可以求出正、反垂点太阳或月球引潮力的大小。当然地面上任何一点的引潮力也可用类似上面的公式计算，只不过式中的 r 已有减小，且离正、反垂点愈远，r 愈小。

上面两式还表明了影响引潮力大小的因素有三：一是天体到地球中心的距离，且引潮力大小与这个天体距离的 3 次方成反比；二是吸引天体的质量，引潮力大小与天体的质量成正比；三是地面上距以正、反垂点为两极的大圆的距离，即 r，引潮力大小与 r 成正比。

我们已经知道 r 在正、反垂点最大，离正、反垂点愈远，r 愈小，在地球表面上与正、反垂点等距离的大圆上，r 最小。由此我们可以分析得出引潮力大小在地球表面的分布规律如下：

向日（月）半球：引潮力均为正值，正垂点最大，方向向上，自此点沿地球表面向四周逐渐减小，且方向不完全向上（图 2-30）。向月（日）面的潮汐称为顺潮。

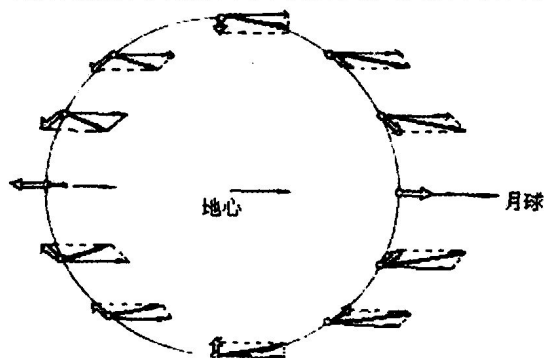
背日（月）半球：引潮力均为负值，反垂点绝对值最大，方向向上，自此点沿地球表面向四周绝对值逐渐减小，且方向不完全向上。背月（日）面的潮汐称为对潮。

图中细箭头为平均引力，粗箭头为实际引力，空心箭头为引潮力

图 2-30 引潮力的分布

太阳和月球都是离地球较近的天体，他们对地球都有引潮力，都会使地球上出现潮汐现象。由太阳引潮力而使地球产生的潮汐称为太阳潮；由月球引潮力而使地球产生的潮汐称为太阴潮。自然，引潮力大小与天体的质量和距离有关，而太阳、月球的质量不同，它们到地球的距离也不同，因此，太阳潮和太阴潮的大小也就不同。我们可以通过引潮力公式求出它们在正、反垂点引潮力的绝对数值；我们也可以通过引潮力公式求出它们在正、反垂点引潮力的相对大小：

$$\Delta F_{\odot} / \Delta f_{D} = 2GM_{\odot}r / D^3 \div 2GM_{D}r / d^3 = 1/2.18$$

式中 $M_{\odot}$、M_{D}、D、d、r 分别是太阳质量、月球质量、日地距离、月地距离和地球半径。由此可见，月球引潮力是太阳引潮力的 2.18 倍。这就是为什么古人指出“涛之起也，随月盛衰”、“随日而应月”、“盈于朔望”、“虚于上下弦”的原因。

2. 海面的潮汐涨落

由于月球和太阳的引潮力作用，海洋表面就会因潮汐而有涨落现象。海水位由低逐渐变为最高的过程称为涨潮；海水位由高逐渐变为最低的过程称为落潮。涨潮转变为落潮时水位最高，为高潮；落潮转变为涨潮时水位最低，为低潮。高潮和低潮的水位差叫潮差。上述现象都是周期性现象，周期为 12 时 25 分，是半个太阴日的长度。因此，在纬度小于 $90° - \delta$（月球赤纬）的地球表面上，一天有两次涨潮和两次落潮，两次高潮两次低潮，但潮高并不完全相同。因此一天中的潮差也可能不同，除此之外，潮差还有为期半个朔望月的周期性变化，潮差最大时的潮汐叫大潮，潮差最小时的潮汐叫小潮。因此，每个朔望月有两次大潮和两次小潮。

我们知道海水总量是比较确定的，因此，一地涨潮意味这里的海水量增加，一地落潮意味这里的海水量减少，在这种此涨彼落中，必然伴随着海水的流动，称为潮波。海水从落潮区流向涨潮区的现象叫潮流。

3. 地球潮汐变形

通过对 $F_O = Gm/d^2$、$F_A = Gm/(d-r)^2$ 和 $F_B = Gm/(d+r)^2$ 三式分析，我们可得 $F_A > F_O > F_B$，根据牛顿运动第二定律 $F=ma$（当 m 为单位质量时，$F=a$），显然 $a_A > a_O > a_B$，如果将地球中心 O 点看作是地球的平衡位置，则 A 点相对 O 点有位移，B 点相对 O 点也有位移，只是位移方向与 A 点相反。根据引潮力的大小和分布，我们知道，正、反垂点潮位最高，向外隆起，从正、反垂点沿球面潮位逐渐降低，直到与正、反垂点等距离的大圆达最低（图 2-31）。这样就会在正、反垂点连线的方向上使地球变长而成为长球体，这就是地球潮汐变形。由于正、反垂点在地球表面呈周期性移动，这种潮汐变形也就具有周期性。当然地球潮汐变形只存在于天体的相互绕转中。

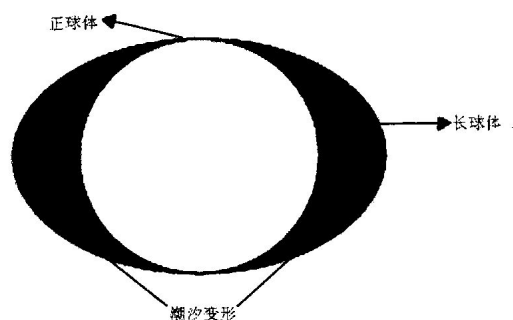



图 2-31 地球潮汐变形

4. 海洋潮汐的基本周期

海洋潮汐主要是日、月引潮力所致，而月球绕地球公转、地球自转和绕太阳公转以及它们三者相对位置的变化都具有周期性，因此，海洋潮汐也具有周期性。

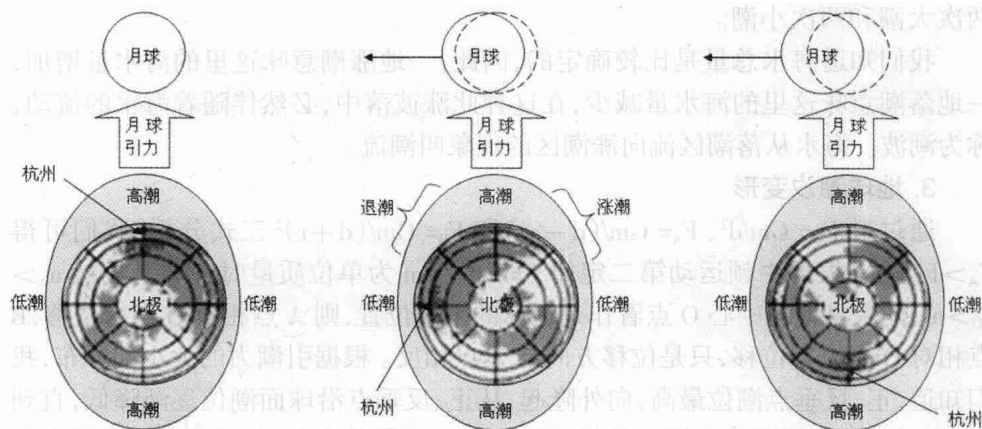
在日、月引潮力中，月球的引潮力占主导地位，亦即以太阴潮为主，太阴周期是海洋潮汐的一个基本周期，即在一个太阴日内有两次高潮和两次低潮；这是由于地球自西向东自转和月球自西向东公转导致正反垂点自东向西移动所致。当正反垂点移向某区域，该区域涨潮，离开某区域，则某区域落潮。对某一地点，一个太阴日内，有一次在正垂点方向，有一次在反垂点方向，因而有两次涨潮两次落潮，两次高潮和两次低潮。我们知道，太阴日相当于太阳时 24 时 50 分，因此，相对应的同一次高潮比前一日推迟约 50 分钟。

左：高潮发生在月球正下端与地球另一端的海面。如图，杭州有一次高潮（顺潮）；中：当地球自转时，每一处海面均会升降，大约于高潮之后 6 小时 13 分，杭州有一次低潮；右：第一次高潮后 12 时 25 分，杭州出现第二次高潮（对潮），地球已经自转了 186°，而月球移动了 6°。

图 2-32 潮汐的基本周期：每太阴日两次高潮和两次低潮

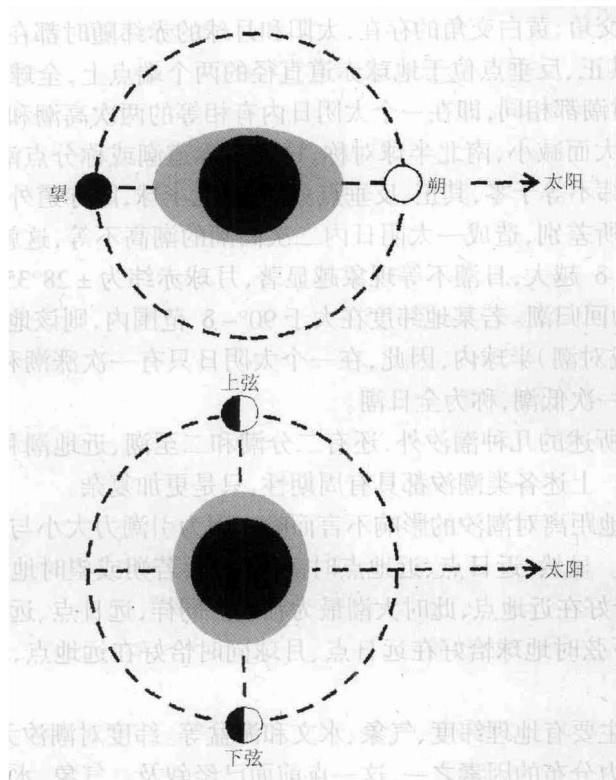



图 2-33 潮汐的基本周期：每朔望月两次大潮（上）和两次小潮（下）

太阳引潮力虽然居次要位置，它所造成的太阳潮也不可低估，它和太阴潮迭加，构成海洋潮汐的另一个基本周期，即朔望周期。也就是在一个朔望月里有两次大潮和两次小潮。每月的朔（初一）和望（十五或十六），月球、太阳、地球处于或接近于一条直线上（图 2-33），太阳潮的正反垂点和太阴潮的正反垂点（或反、正垂点）相重合或接近，太阳潮极大地加强了太阴潮，潮差达极大值，称为大潮或朔望潮；每月的上弦（初八或初九）和下弦（廿二或廿三）因月球、太阳、地球构成直角三角形，太阳潮的正反垂点和太阴潮的正反垂点相差 90°，太阳潮极大地削弱了太阴潮，潮差达极小值，称为小潮或方照潮。大潮小潮顺次更迭，都是约每半月出现一次，即一个朔望月内有两次大潮和两次小潮。大潮出现的时间一般在朔或望后的两天前后。

5. 海洋潮汐的其它周期及复杂性

影响潮汐的因素很多，除了日、月引潮力（形成上述两个基本周期）外，还有许多其它因素，如黄赤交角、黄白交角、日地和月地距离、地理因素等。因此也就造成潮汐的复杂性。

由于黄赤交角、黄白交角的存在,太阳和月球的赤纬随时都在变化。若月球赤纬等于零,其正、反垂点位于地球赤道直径的两个端点上,全球各地只要纬度相同,顺潮和对潮都相同,即在一个太阴日内有相等的两次高潮和两次低潮。且潮高随纬度增大而减小,南北半球对称,这就是赤道潮或称分点潮,也叫做半日潮。若月球赤纬不等于零,其正、反垂点分居南、北半球,除赤道外的同一纬度的顺潮和对潮有所差别,造成一太阴日内二次高潮的潮高不等,这就是日潮不等。并且月球赤纬 δ 越大,日潮不等现象越显著,月球赤纬为 ± 28°35′时,日潮不等达到极限,称为回归潮。若某地纬度在大于 90°- δ 范围内,则该地所在纬线圈全部位于顺潮(或对潮)半球内,因此,在一个太阴日只有一次涨潮和落潮,也就只有一次高潮和一次低潮,称为全日潮。

除了上面所述的几种潮汐外,还有二分潮和二至潮、近地潮和远地潮、近日潮和远日潮等。上述各类潮汐都具有周期性,只是更加复杂。

日地和月地距离对潮汐的影响不言而喻, 因为引潮力大小与吸引天体距离三次方成反比。显然,近日点、近地点时潮高较高,若朔或望时地球恰好在近日点、月球同时恰好在近地点,此时大潮最为壮观。同样,远日点、远地点时潮高较低,若上弦或下弦时地球恰好在远日点、月球同时恰好在远地点,此时大潮应该最小。

地理因素主要有地理纬度、气象、水文和海盆等。纬度对潮汐无直接影响,它只是决定引潮力分布的因素之一,这一点前面已经叙及。气象、水文因素对潮汐的影响是迭加在潮汐的周期性变化上,对潮高有些影响,但不能从根本上影响潮汐的周期和强度。海盆因素包括海底状况、海水深度、海盆形状等。海底是否平坦和海水深浅主要影响到潮流的动能消耗,从而对潮流的速度产生影响;潮流在广阔的海洋面上自东向西传播总体上比较均衡,但是当它们遇到海岸时或河口时,海盆形状对潮流的影响较大, 比如遇到海岸时潮流会因与海岸的撞击而能量逐渐消耗殆尽,同时,海岸会把来自海洋上的水挡回,因此,一般海岸边可以看到潮汐,但并不壮观;但若遇到河流的入海口,情况就大不一样了,来自广阔海洋面上的潮流,既带来大量的物质(水),又带来大量的能量,进入河口,受前述的多种因素影响,水量源源不断,能量源源不断(进入河口后消耗的能量要小得多),导致潮头升高,潮汐比一般海岸所见壮观。我国钱塘江入海口的特殊海盆形状,使得这里成为世界著名的观潮圣地。

此外,摩擦力对潮汐也有影响,它的作用是使高潮(大潮)发生的时间滞后:高潮一般出现在月球上中天或下中天后;大潮一般出现在望或朔后两天左右。

6. 潮汐的意义

潮汐摩擦使天体自转速度减慢。潮汐摩擦一般包括两方面,一是潮流导致的

海水与海水之间的摩擦作用，这种摩擦是由于海水本身具有一定的粘滞性所造成，但摩擦力较小，可导致高潮（大潮）发生的时间滞后，二是潮流对海底的摩擦作用，这种摩擦是由于液态海水与固态海底的界面是不稳定的。此摩擦力与前者相比要大些。我们知道潮波的方向是自东向西，而地球的自转是自西向东，显然仅从这一角度我们可看出潮汐摩擦对地球自转有"刹车"作用，也就是说潮汐摩擦可使地球自转速度减慢。根据对古代日、月食记录的分析研究表明，由于潮汐摩擦，地球的自转周期每个世纪变长 0.0016 秒（约 1～2 毫秒）。这个变化虽然很小，可是经过长期积累，便变化明显。根据这个数据，目前的日长比两千年前的日长要长 0.032 秒（$0.0016\times 20=0.032$ 秒）。从对古珊瑚化石生长线的研究得知，在 37 000 万年前，每年约有 400 天左右，即地球绕太阳公转一周（以春分点为参考点）过程中，地球自转 400 周。而现今，同样地球绕太阳公转一周（以春分点为参考点）过程中，地球自转 365.2422 周。可见，地球的自转速度明显减慢。因此，从长远看，潮汐摩擦作用不可忽视。

潮汐摩擦作用可使地球自转速度减慢，自然地球的潮汐作用也会使月球自转速度减慢，由于地球对月球的潮汐作用更加强大，目前月球的自转已经很慢，即它的自转速度与它的公转速度相同，即所谓同步自转。太阳系其它行星的几个较大的卫星，如火卫一、木卫一至木卫四和海卫一，也因母行星的潮汐摩擦作用而成为同步自转卫星。

引潮力有使天体瓦解的作用。从对海潮分析的情况来看，一天体施与另一天体上的引潮力在正、反两个方向把天体拉长，引潮力与距离的三次方成反比，当绕中心天体旋转的小天体的距离小到一定限度以内，引潮力可能超过小天体内物质间的引力，使小天体瓦解。当然这个极限距离与小天体的密度也有关系。如果小天体内物质松散，在较远一些的距离上就会瓦解，法国天文学家洛希（1820–1883）1848 年首次求得了这个极限距离，称为洛希极限。如果用 A 表示这个距离，则有：

$$A=2.45539\left(\frac{\rho_1}{\rho_1'}\right)^{\frac{1}{3}}R$$

式中，R 为中心天体半径，ρ_1 即为中心天体密度，ρ_1' 即为绕转小天体的密度。如果卫星落在行星的洛希极限内，就会被行星的引潮力拉碎。地球的洛希极限为 15 562km，假如月球落入该距离内，月球将被地球撕成碎块。太阳系中土星、木星、天王星、海王星都有光环，具有一定的普遍性，一般认为行星环是原来外面的卫星落入洛希极限内被引潮力瓦解形成的，或是在演化初期残留在洛希极限内的物质无法凝聚成卫星。

潮汐现象在国民经济中具有重要的意义。各种海洋事业、海岸带发展都与潮

汐涨落密切相关。人们根据潮汐涨落规律，张网捕鱼，引水晒盐，发展滩涂养殖业。潮汐发电可作为日益紧缺的能源补充，是沿海无污染、廉价的电力来源。潮汐作用的范围是规划沿海城市建设、港口建设和海运发展的重要依据。潮汐现象是重要的旅游资源，是规划此类旅游景点的前提条件。国际规定领海以海水落得最低时的海岸线为准。显然，决定一个国家的领海线，也与潮汐现象有关。

思考与练习

1. 解释下列名词

恒星日、太阳日、太阴日、恒星年、回归年、恒星月、朔望月、食季、食限、地轴进动、大潮、引潮力。

2. 列举哪些事实可以证明地球公转？

3. 如何根据半昼弧公式求昼夜长短？昼夜等长、昼长夜短、昼短夜长、极昼、极夜的条件是什么？

4. 简述月相成因及变化规律。

5. 简述日食月食的成因和过程。

6. 海洋潮汐的基本周期是什么？

第三章 太阳和太阳系

太阳是离我们最近的恒星,它的巨大质量使得有众多的天体绕它公转,从而构成所谓的太阳系。我们的地球就是太阳系这个大家庭中的一个成员。本章主要介绍太阳的基本知识以及太阳系各成员的基本情况。

第一节 太 阳

太阳是太阳系的中心天体,是太阳系的主宰,它的巨大引力为太阳系其它天体提供重要动能,它的强烈辐射为太阳系其它天体提供重要热能。太阳对我们地球来说显得尤为重要。

一、太阳概况

太阳(用符号⊙表示)是一颗既普通又特殊的恒星。普通是针对它在整个恒星世界而言:它的体积和质量比较居中,它的年龄和大多数恒星一样,属于中年期;它的化学成分主要是氢和氦,分别占71%和27%,次要成分有碳、氮、氧等,大约只占2%,它的其它物理参数如密度、温度和光度等也都与其它恒星差不多,因此它是恒星家族中很普通的一员;特殊是对太阳系,特别是对地球而言,主要表现在六个方面:一是在太阳系中它的半径大约为695 990km,相当于地球半径的109倍;质量接近2 000亿亿亿吨,占整个太阳系总质量的99.865%,是地球质量的33万多倍,是整个行星质量总和的745倍;二是由于它的体积和质量十分巨大,在太阳系中占绝对优势,造成太阳系中几乎所有的天体都直接或间接的绕它旋转,太阳成为太阳系的中心天体;三是由于同样的原因,导致它的中心密度、压力和温度都很高,分别约为160 g cm^{-3}、3.4×10^{17}dyne cm^{-2}和1.5×10^{7}K。因而进行着热核反应,成为太阳系中唯一能自行发可见光的天体;四是它是距太阳系中所有天体(包括我们的地球)最近的一颗恒星,因而具有与其它恒星不同的“表现”:太阳是一个视半径(太阳中心位于地平时,太阳半径对于观测者的张角。)约为16′的光辉灿烂的圆盘,而不像其它恒星只是天球上的光点,赋于地球等八大行星的辐射能比较多,其它恒星到达地球的辐射能甚至可以忽略。另外,它还表

现出以一年为周期、以其它恒星为背景的巡天运动；五是由于太阳到地球的距离不远也不近(以及地球本身的物理参数和性质)，地球所获得的太阳辐射能不多也不少，因而地球表面的温度不高也不低，致使地球上出现生命现象；六是由于太阳是最典型的恒星也是最近的恒星，因此我们可通过对太阳的研究，来认识数以亿计的其他类似于太阳的恒星。关于太阳的基本参数见附录 1。

二、太阳的结构

1. 太阳的内部结构

太阳是一个炽热的气体球，从理论上说，没有截然的界面将太阳内部分成几层，但根据直接和间接的资料，大致将太阳分为核反应区、辐射区、对流区(图 3-1)。

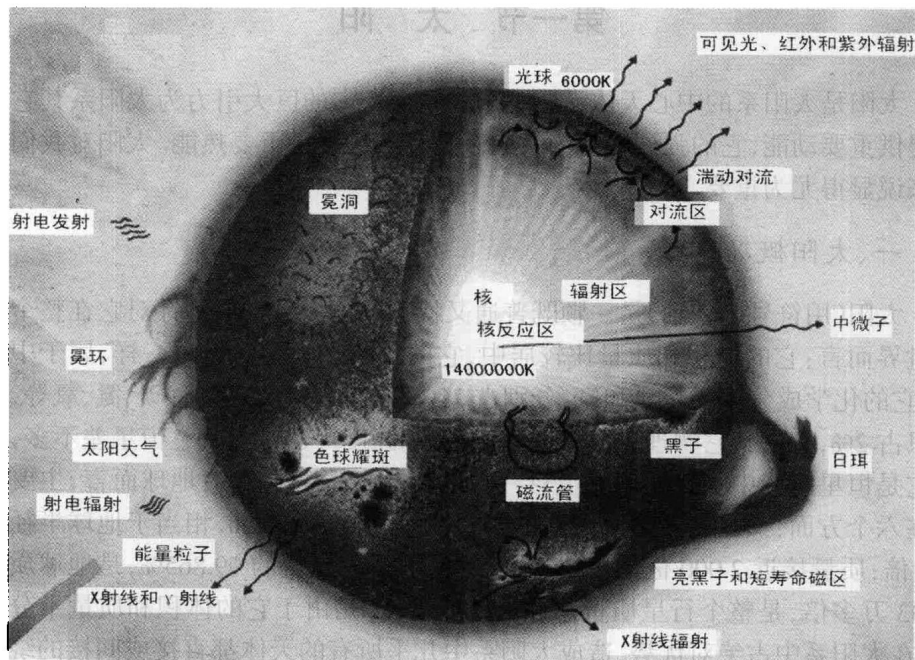



图 3-1 太阳的结构

核反应区：位于太阳的中心部位，半径大约为 0.25 个太阳半径，体积是太阳的六十四分之一，由于这里高温、高压和高密度，因而具备产生热核反应的条件，即由四个氢原子核聚变为一个氦原子核 ($4^1H \rightarrow 1^4He$)，同时产生正电子、中微子和光子，因此太阳能量的 99%是从这里产生的。由于这里的热核反应十分稳定，太阳也就连续不断地比较稳定地向宇宙空间发射辐射。

辐射区：位于核反应区外围，厚度大约为 0.6 个太阳半径。这里从里向外各

层密度、压力、温度渐次降低并都比核反应区低，本身不会产生热核反应，并保持相对稳定，但核反应区产生的能量通过该区向外传播，光子经过这里与粒子碰撞，经多次被吸收之后再次发射，从里向外能量也逐渐降低，依次为 ν 射线、X 射线、紫外线，最后成为可见光和能量更低的其它形式到达太阳表面并向外发出辐射。

对流区：位于辐射区外围直至太阳表面，厚度大约为 0.15 个太阳半径。辐射区将核反应区的能量带到这里，从里向外温度梯度很大，流体静力平衡遭到破坏，里外处于不稳定状态，造成该区内上下物质的对流。物质的对流伴随大量的能量向太阳表层输送，因此，它的对流状态是造成太阳大气中各种活动现象的重要原因。

2. 太阳大气——太阳的外部结构

太阳大气是指在一定条件下，可以被直接观测到的外部层次即太阳的外部结构。由于高温，太阳大气电离成等离子体。根据温度、亮度和密度等，太阳大气自下而上可分为光球、色球和日冕三层：

光球层：是太阳大气的最底层，厚度约 500km，由于太阳的内部我们是看不到的，因此我们所见到的太阳视圆面实际就是太阳的光球，我们在地球上接受到的太阳辐射，来自于光球。光球的有效温度为 5 770k，这一温度一般也被认为是太阳的表面温度，因为温度高，所以亮度很亮，密度也很低，在光球层内自下而上，温度、密度有所不同，加之来自太阳内部的影响，光球中不仅布满“米粒组织”，而且在局部地区常常会出现黑子、光斑等现象。

色球层：位于光球层的上部，厚度约 2 000 ~ 10 000km，亮度只有光球的万分之一，总是被光球的强烈光辉所淹没，因而平时难以见到。色球层的存在，是通过日全食观测得到的，现在是通过专门的仪器，利用单色光来对色球层进行观测。色球层表现为边缘不整，呈锯齿状的玫瑰色花边，色泽鲜艳。色球层亮度低，但其温度却比光球层高得多，可达万度甚至十几万度。色球层内还因磁场不稳定而经常出现耀斑爆发及与其共生的日珥等。色球层的物质密度也很低，并随高度增加急剧下降。

日冕：是大气的最外层，延伸范围很广，可达太阳半径的数倍。日冕层亮度更低，只有色球的千分之一，只能发出微弱的光，平时也不能见到，只有在日全食或用特殊的仪器才能见到，表现为银白色，且形状和大小变幻不定。日冕内物质密度极低，不到地球表面大气的十亿分之一，也可以认为日冕没有明显的上界。日冕的温度很高，可达百万度以上，这种高温可能是由于这里的物质运动速度极高所致，而且日冕高速膨胀，不断向行星际空间喷发出的高温、高速、低密度的粒子流，我们称为太阳风。太阳风可“吹”遍整个太阳系，其速度和密度等随离太阳距

离改变而变化，在地球附近，太阳风速度约为 450km/s，平均密度约为 5 个粒子 /cm^3，温度为 5×10^4–5×10^5K，磁场为 6×10^{-9} 高斯。

三、太阳距离、大小和质量的测算

1. 太阳距离的测定

天文学上所使用距离单位主要有：秒差距、光年和天文单位。秒差距是恒星周年视差为 1″时，所对应的距离，用 pc 表示；光年是光在一年时间内所走过的距离，用 ly 表示；天文单位是日地平均距离，用 AU 表示。日地平均距离如何测定？从理论上讲可以用三角视差法，即测定太阳的地平视差 $P_\odot$（太阳中心位于地平时地球半径对于太阳中心的张角）（图 3–2），当 $P_\odot$被测定后（等于 8″.79415），已知地球半径，即可用公式 $D=R/\sin P_\odot$求出日地距离。但是由于太阳是一个具有强

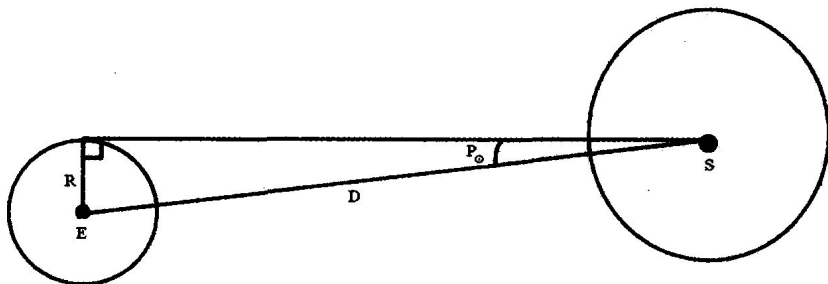



图 3–2 用视差法测日地距离

烈光辉的视圆面，用望远镜找到视圆面的中心是困难的，另外望远镜也不宜长时间在强烈太阳辐射下工作，因此实际测日地距离最早采用的是如下间接方法（图 3–3）：设日地距离为 a，某行星（或小行星）到太阳的距离为 a_1，当该星冲日时，它到地球的距离是 a_1-a，此时测定其地平视差，可求出 $a_1-a=m$，根据开普勒行星运

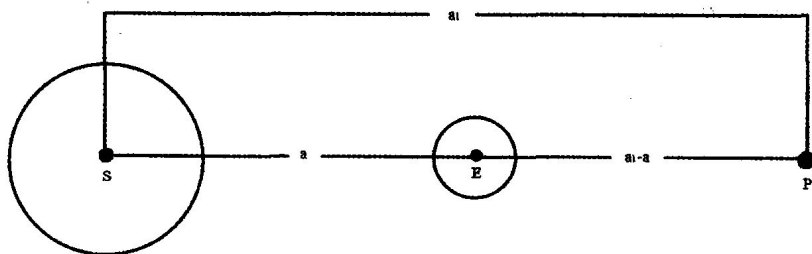



图 3–3 利用小行星测定日地平均距离

动第三定律（详见本章第二节）即：两行星绕太阳公转周期（T_1 和 T）的平方之比，等于它们到太阳距离（a_1 和 a）的三次方之比。即：$\frac{a_1^3}{a^3}=\frac{T_1^2}{T^2}$开立方得：$\frac{a_1}{a}=\sqrt[3]{\frac{T_1^2}{T^2}}$ 。式

中 T 和 T_1 可精确测定，因而等号右边可算出，令其为 n，于是可联列二元一次方程组：

$$\begin{cases} a_1 - a = m \\ a_1 / a = n \end{cases}$$

因而可以求出日地距离 a 和该星到太阳的距离 a_1。

近年来，由于科学技术进步和天文测量手段的更新和优化，日地距离的数值日趋精确，目前采用的最新值为：1.49597892×10^8km。

2. 太阳大小的测定

太阳是地球的绕转天体，也是距地球最近的恒星。因此它不象其它恒星那样是一个光点，而具有视圆面，于是我们可以测定它的视半径（$\rho_\odot$）即太阳在位于地平时，其线半径对人眼（或仪器）的张角，这个角度是 15′59″.65，在知道日地距离的情况下，我们很容易根据下式，求出太阳的线半径：

$$R_\odot = D \cdot \sin\rho_\odot = 6.96 \times 10^5 \text{km} \approx 70\text{万千米}$$

这个值大约是地球半径的 109 倍。

3. 太阳质量的测算

地球是绕太阳公转的，长时间观测得知，地球公转的速度既没有变快也没有变慢，地球到太阳的距离既没有变远也没有变近，这就意味着，地球和太阳之间的作用力是平衡的。我们知道，太阳对地球的引力为：

$F=GM_\odot m/R^2$（式中 m 是地球质量，$M_\odot$是太阳质量，R 是日地平均距离。）

而地球绕太阳公转的向心力为：

$f=mv^2/R$（式中 m，R 同前，v 为地球绕日公转的速度）。

于是 F 应等于 f，因而得出下式：$GM_\odot m/R^2 = mv^2/R$，整理后得：$M_\odot = \frac{Rv^2}{G}$，此式等号右侧的 R、v、G 都是已知的，代入式中即可求得太阳质量 $M_\odot = 1.988 \times 10^{30}$kg≈2000 亿亿亿吨。这个质量是地球质量的 33 万余倍，是全部行星质量总和的 745 倍。太阳质量占整个太阳系质量的 99.865%。

由太阳的半径和质量可以求得太阳的平均密度为 1.41g/cm³，大约是地球平均密度的四分之一。

四、太阳能量的来源

太阳是太阳系的中心天体，是太阳系光和热的源泉，其发出的能量主要来自于其内部的热核反应（详见第四章第三节）。那么太阳每秒向外发出多少能量呢？我们采用如下方法：地球位于日地平均距离处并排除大气影响，在垂直太阳光的条件下，测定地面上单位面积（cm^2）每分钟所接受到的太阳热量，测定的值为

8.16J cm^{-2} min^{-1}，这就是太阳常数。那么以太阳为中心，以日地平均距离为半径的球表面积应等于 $2.83 \times 10^{27}cm^2$，乘以太阳常数，得 3.85×10^{26}J s^{-1}。这个能量若全部集中于地球表面，足以使 150km 厚的冰层融化成 0℃的水。发射这么多能量，使太阳每秒钟损失大约 430 万吨质量，再乘以 86 400s，太阳每天向外发出的能量为：3.326×10^{31}J。

太阳发出的能量十分巨大，但由于地球半径较小，其每秒钟获得的太阳辐射能只有 1.74×10^{17}J s^{-1}，大约是太阳辐射总量的 22 亿分之一，可却占地球总能量收入的 99%以上。

五、太阳活动

长期观测发现，太阳整体上是一颗基本稳定的恒星。但是它的大气在某些时候也会出现局部的剧烈的变化，如光球层黑子的出没，色球层耀斑的激烈爆发及相伴的日珥活动，日冕出现的冕环和日冕物质抛射等。我们把这种变化叫做太阳活动。

太阳活动最明显的标志是太阳黑子（图 3–4），它是光球上经常出没的暗黑色的斑点。

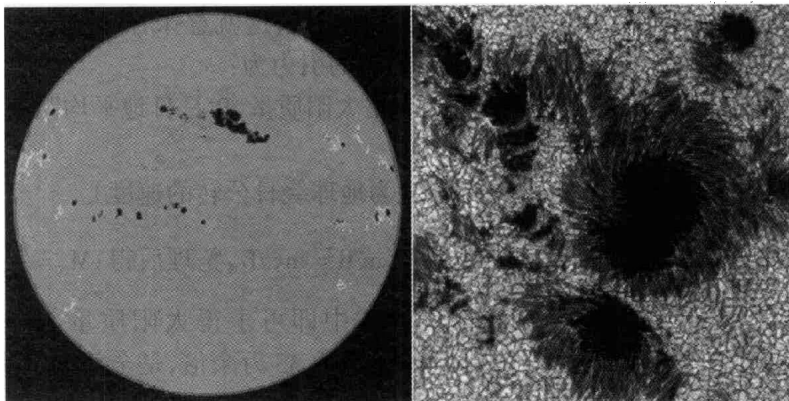



图 3–4 太阳黑子

一般认为它是太阳表面剧烈活动所激起的大气旋涡；也有认为是膨胀着的大气团。它表现出的暗黑色是因膨胀造成温度下降所致。黑子的形成未有公论，但普遍认为与那里的强磁场有关。

太阳黑子的温度约为 4 500K，但在 5 770K 的光球背景下，黑子显得较为暗黑。黑子具有很强的磁场，大约在 1 000 到 5 000 高斯之间，黑子面积越大，磁场强度越强，每两个相邻近的黑子磁极方向相反。黑子大小不等，形态各异。小的可达 1 000km，大的甚至可达 20 万千米以上。黑子的形状象一个浅碟，中部缓缓凹

陷。太阳黑子有生有灭，其寿命与黑子大小有关，小黑子仅几个小时，大黑子(群)可持续数月。为了表示太阳黑子的多少，1849年瑞士苏黎世天文台的沃尔夫提出太阳黑子相对数(R)的概念，用下式表示：

$$R=k(10g+f)$$

式中k为换算因子，与观测技术、方法及观测时的天气有关；g是观测到的黑子群数；f是观测到的单个黑子总数。黑子的活动有一定特点，一是它们常成双成群出现并不断成长、衰竭以至消失。二是多出现在日面南北纬5°—25°的区域，赤道及高于45度纬度的区域较少出现。观测发现黑子在日面上有自东向西缓慢移动现象，其形状也发生相应改变。据此表象可确信太阳也有自转。三是太阳黑子活动强弱平均有11年的周期变化。人类对太阳黑子早有观测，我国有世界最早观测记录(公元前28年)。长期观测积累的资料表明：太阳黑子活动具有周期性，最长周期达13.6年，最短的也有9年。国际上规定：从黑子最少的1755年3月到1766年为第一个太阳活动周，以后每11年为一活动周，并依顺序编号，照此推算，2008年开始进入第24个周期(图3-5，下图)。太阳黑子在日面出现的纬度位置与太阳黑子活动的时间有关，一个活动周开始，黑子出现纬度较高，约为30°附近，随后出现纬度逐渐降低，周期之末，达到最低纬度。如在一个太阳活动周内，以黑子群的平均日面纬度为纵坐标，以时间为横坐标，则可绘出黑子群在日面纬度上的分布图，天文学上称之为孟德尔蝴蝶图(图3-5，上图)。光斑与黑子相反，是光球上明亮的斑点，常出现在日轮边缘，平均寿命为15天，可能是光球上更炽热的气团。它的出现与太阳黑子有密切联系。

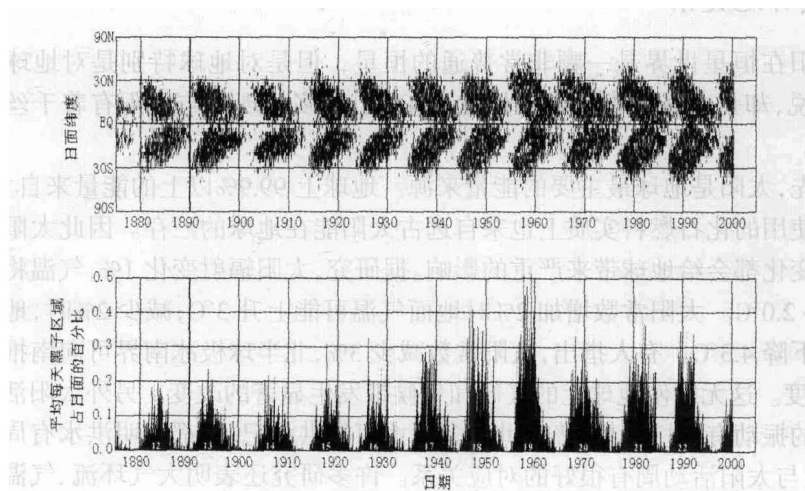



图3-5　孟德尔蝴蝶图和太阳活动周

除了光球层的太阳黑子和光斑外，色球层内也会出现谱斑、耀斑和日珥等。

谱斑有亮谱斑和暗谱斑之分，前者是色球层上大块增亮区，后者则是色球层上一些暗黑区。谱斑的线度从几千千米到几十万千米，其形状、结构、亮度常在变化。谱斑与太阳黑子有密切联系，大部分谱斑附近有黑子群，黑子多时，谱斑也较多、较大、较亮。一般比黑子先出现而晚消失，因而寿命比黑子长。耀斑是发生在色球层高层和低日冕区的一种剧烈太阳大气活动，亦称色球爆发，表现为日面上局部区域的突然增亮。耀斑不仅是太阳活动中最剧烈的一种，比如，一次大耀斑产生的总能量相当于100亿个百万吨级氢弹的威力。其过程也是最复杂的，耀斑除了发射很强的无线电波外，还发射大量的紫外线、X射线、ν 射线，同时还喷发出大量的高能粒子，包括质子、中子和电子等，由此可见一斑。耀斑难以用白光看到，偶尔能看到的是白光耀斑。耀斑的寿命很短，平均约4~10分钟。耀斑的出现与黑子也有很大的关系，一般在黑子的极大时段，耀斑活动最为强烈。大多数耀斑出现在黑子群的生长或瓦解阶段，主要发生在双极黑子群附近，尤其是磁性复杂的多极黑子群附近，很少发生在单极黑子附近。日珥则是从色球不断喷射出来的火焰状物质，形态多种多样，千变万化，其活动速度为250km/s，高度可达几十万千米，有的长期存在于日冕中，有的再落回色球层。日珥的物质密度是日冕的1 000至10 000倍，温度约为7 000K，比日冕低，因而肉眼只有在日全食时才能观测到。日珥大小不一，一般长约20 000km，高约30 000km，厚约5 000km。根据形态和运动特征，日珥可分多种类型，不同类型的日珥，寿命也各不相同，有的可达数月，有的仅几小时甚至几分钟。

六、日地关系

太阳在恒星世界是一颗非常普通的恒星，但是对地球特别是对地球上的人类来说，却是一颗非常重要的恒星。地球上众多的现象与太阳有着千丝万缕的联系。

首先，太阳是地球最主要的能量来源。地球上99.9%以上的能量来自太阳，我们所使用的化石燃料实质上也来自远古太阳能在地球的贮存。因此太阳辐射的微小变化都会给地球带来严重的影响。据研究，太阳辐射变化1%，气温将变化0.65℃~2.0℃。太阳常数增加2%时地面气温可能上升3℃；减少2%时，地面气温可能下降4.3℃。有人指出，太阳常数减少3%，北半球极冰南界可向南推进约10个纬度。这无疑使地球上的气候和气候带发生显著的改变。另外太阳活动周与气候的振动有密切关系，普查世界多条大河的洪水记录，都表明洪水有周期性变化，且与太阳活动周有很好的对应关系。许多研究还表明大气环流、气温和梅雨的早晚也与太阳活动的22年周期有关。当然如果太阳活动十分强烈时，地球所受到的影响更为严重，比如臭氧层受太阳活动影响最大，它的变化会导致全球

气温的变化,太阳活动峰年期往往会造成世界上众多地区的气候反常。如干旱、洪涝、酷暑、大雪等。

其次,太阳活动对地球上的生物特别是对人类的健康产生影响。太阳(和月球)的引潮力会引起生物体内物质(含水分)的重新分布,造成生物行为和情绪的变化。另外地球磁场对人类的内分泌具有显著的调制作用,神经系统对地球磁场也十分敏感。因此当太阳发生强烈活动并引起地磁扰动时,人体相关平衡失调,某些功能发生紊能,也会造成行为、情绪异常或失控。据研究,高频电磁波强烈照射时,可使人类免疫系统发生障碍、淋巴细胞发生病变,导致某些疾病发生。

再者,太阳或太阳活动可导致地球大气某些现象的出现。比如在高纬度近地磁极地区会出现极光现象,即太阳带电高能粒子流(可达 10 千电子伏)使地球高层分子或原子激发或电离而产生的现象,常呈淡绿色、红色或粉红色的光带、光弧或幕状。极光出现时可持续几分钟到几小时。极光出现的强度和频繁程度与太阳活动的程度密切相关,统计结果也证明它们之间有较好的相关性。再如,太阳紫外线和 X 射线的作用可使地球大气(80km 到 500km 范围内)形成几个密度较大的电离层;分别是 D、E、F 和 F_2,地面的短波无线电通讯主要靠电离层反射传播。但 D 层由于电子密度小,不能直接反射无线电波,相反却起着吸收作用。当太阳活动强烈(如耀斑出现)时,对电离层有"骚扰"作用,导致无线电信号被强烈吸收而减弱或中断。1972 年 8 月 7 日的耀斑大爆发时,导致当时几乎所有飞机和轮船罗盘失灵,全世界所有短波通讯中断,一些地区的弱电设备、电力和电子设备不能正常工作。另外臭氧层(位于平流层中 10~50km 高度)也会受到太阳紫外辐射量的变化的影响,从而使大气环流发生变化,进而影响天气和气候。

另外,太阳活动还可诱发地震,大耀斑爆发甚至会使地球自转速度减慢。

第二节 太阳系

人类对太阳系的认识经过了相当漫长的历程。无论是中国汉代的盖天说、浑天说、宣夜说,还是后来外国的地心说、日心说都是对宇宙体系的模型的设计,虽然认识并不准确,有的甚至是错误的,但有两个共同点值得肯定:一是人类给浩瀚的宇宙建立模型本身就是一个十分大胆的创新;二是立足地球或太阳来建立宇宙模式,实质上应看作是我们现在所说的地心天球或日心天球。而对太阳系的认识是在数百年的时间里逐渐完善的。

一、太阳系概况

太阳系中除了太阳本身之外,还有在其引力范围内的八大行星:(自离太阳

由近及远）水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星（图 3–6），还有一度被称为第九大行星的矮行星冥王星（由于其轨道主要在海王星之外，因而被称为海王星外天体，简称海外天体，记为 TNO）以及它们的卫星（表 3–1）；另外还有众多的小行星、彗星、流星体以及行星际空间的弥漫物质（其主要成分是原子、分子、有机分子和尘埃颗粒等）。

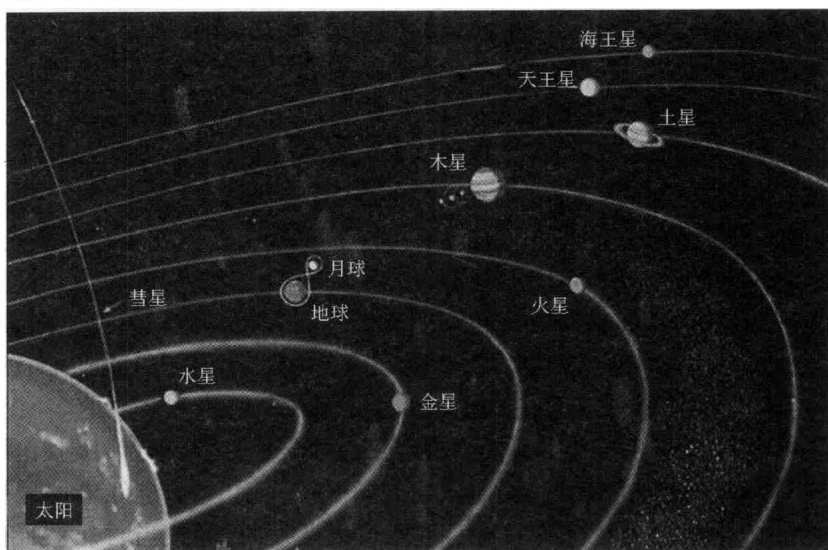



图 3–6 太阳系

太阳系的总质量估计大约为 2 000 亿亿亿吨，太阳质量占 99.865%，除太阳之外的太阳系所有天体总质量仅占太阳系总质量的 0.135%（表 3–1），这个质量的巨大差异，决定了它们的主从地位，即后者直接或间接绕太阳运行。我们知道角动量（j）大小与物体的运动速度（v）、质量（m）和运动半径（a）有关，即 $j=mva$，太阳质量如此巨大，但计算表明其角动量只占太阳系总角动量的 0.6%不到，而太阳系其它天体却占了 99.4%以上，这就是太阳系的角动量分布异常。

太阳系中除太阳可自行发可见光而被我们直接看到外，其它天体则由于反射太阳光才被我们看到。

由于太阳的巨大质量，太阳系的天体都绕着太阳运行即公转，方向都是自西向东。同时它们本身也在公转的同时绕自己的自转轴在自转，除了金星和天王星是自东向西自转及个别卫星的自转方向特殊外，其它大行星和卫星的自转方向都和太阳的自转方向相同即自西向东自转。八大行星的公转轨道都是椭圆，除水星的轨道略扁外，其余大行星轨道偏心率都很小，很接近正圆。另外，八大行星的公转轨道所在的平面，相对于黄道面最大倾角不到 7°，很接近黄道面。卫星的轨道平面也都接近各自绕转行星的轨道面。

表 3-1 太阳系主要成员(太阳、八大行星、冥王星、月球、谷神星、彗星)的主要物理参量与地球参量的比较

	平均离日距离(AU)	轨道周期(地球年)	质量($m_{地}$)	半径($R_{地}$)	卫星数目	自转周期(/d)	平均密度($kg \cdot m^{-3}$)
水星	0.39	0.24	0.055	0.38	0	59	5 400
金星	0.72	0.62	0.82	0.95	0	–243	5 200
地球	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1.0	5 500
月球	–	–	0.012	0.27	–	27.3	3 300
火星	1.5	1.9	0.11	0.53	2	1.0	3 900
谷神星(小行星)	2.8	4.7	0.000 15	0.073	0	0.38	2 700
木星	5.2	11.9	318	11.2	61	0.41	1 300
土星	9.5	29.4	95	9.5	31	0.44	700
天王星	19.2	84	15	4.0	24	–0.72	1 300
海王星	30.1	164	17	3.9	11	0.67	1 600
冥王星	39.5	248	0.002	0.2	3	–6.4	2 100
彗星 Hale–Bopp	180	2 400	1.0×10^{-9}	0.004	–	0.47	100
太阳	–		332 000	109	–	25.8	1 400

二、开普勒行星运动三大定律

行星绕转太阳除了具有上述一些浅层次特征外，德国天文学家开普勒在第谷大量行星观测资料的基础上，前后用了 10 年时间分析总结出行星运动的如下三个重要数学特征，即开普勒行星运动三大定律(图 3–7)。

左:轨道定律　　中:面速度定律　　右:周期定律

图 3–7 开普勒行星运动三定律

第一定律(又称轨道定律):所有行星绕太阳公转的轨道都是椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

第二定律(又称面速度定律):行星的向径(行星中心与太阳中心的连线)在单位时间内扫过的面积相等。

第三定律(又称周期定律):行星绕太阳公转的周期(T)的平方与其轨道半径(α)的立方成正比:即 $\frac{T^2}{a^3}$= 常数。当然我们也可以表述为:任意两个行星绕太阳公转周期(T_1 和 T_2)的平方之比等于它们轨道半长径(a_1 和 a_2)的立方之比。即

$\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{a_1^3}{a_2^3}$。开普勒行星运动三大定律也适用于太阳系的小行星、彗星、流星体等小天体，同样也适用于恒星中的双星系统以及一切在引力作用下相互绕转的天体系统。这一发现奠定了天体力学的基础，并导致了1678年牛顿万有引力定律的发现。开普勒还因他的这一成就被后世学者尊称为“天空的立法者”。

三、牛顿修正开普勒行星三定律

开普勒定律是天文学上非常重要的定律，但应指出的是他总结的三大定律是根据观测数据分析得出的经验定律。牛顿发现万有引力定律之后，才正式把研究天体的运动建立在力学理论的基础之上，从而创立了天体力学。在万有引力定律基础上，牛顿对开普勒定律作了修正，给出了更具普遍的形式：

第一定律即轨道定律：天体绕太阳公转的轨道面是一个平面，轨道的形状为圆锥曲线。目前观测到的行星轨道都是椭圆，但彗星则具有椭圆，抛物线和双曲线三种轨道。

第二定律即面速度定律：牛顿用积分法来求曲边形的面积，从而证明在太阳引力作用下，天体绕太阳运行的动量矩是守恒的，从而给出面积定律的实质。

第三定律即周期定律：万有引力定律是从开普勒第三定律导出的，反过来牛顿又应用万有引力定律对第三定律进行了重要的修正。即：行星绕太阳公转半长径(α)的立方与其周期的平方及两者质量之和的乘积成正比。即：

$$\frac{a^3}{T^2(M_\odot+m)}=\frac{G}{4\pi^2}$$

式中$M_\odot$和m分别为太阳和行星的质量，G为引力常数。同样也可表述为：任意两行星绕太阳公轨半长径(a_1和a_2)的立方之比等于它们绕太阳公转周期(T_1和T_2)的平方乘以该行星质量(m_1和m_2)与太阳质量($M_\odot$)之和之比。即：

$$\frac{a_1^3}{a_2^3}=\frac{T_1^2(M_\odot+m_1)}{T_2^3(M_\odot+m_2)}$$

由第二定律知道，行星在轨道上的运动速度是不均匀的，在近日点附近比在远日点附近快，由第三定律知道，行星离太阳越远，公转周期越长，它们之间有确定的数量关系。同时与质量也有关系。

牛顿修正后的行星三大定律十分重要，牛顿给出的是行星运动的原因和实质，即行星为什么这样运动，而开普勒只是描述了行星运动的表象，即行星是怎

样运动的。运用牛顿修正后的第三定律，可以测定那些有卫星(或伴星)的天体的质量和或质量比。如，利用$\frac{a_1^3}{a_2^3}=\frac{T_1^2(M_\odot+m_1)}{T_2^3(M_\odot+m_2)}$式，只要测定天体的绕转周期T和半长径$a$，即可求出天体质量和$(M_\odot+m)=4\pi^2a^3/GT^2$，已知一个天体质量(如太阳)就可知道另一天体(如行星)的质量。也可以在已知地球公转周期、半长径和质量以及太阳质量前提下，测定某一行星周期和半长径即可求出该行星的质量。

四、提丢斯－波得定则

关于行星到太阳距离规律的探索，最著名的是德国的提丢斯，他于1766年公布他的方法：取一组数列：0、3、6、12、24、48……，在每一个数上加4后除以10，所得的新数列就是自太阳由近到远各行星到太阳距离的天文单位数。1772年德国天文学家波得进一步研究了这个问题并予发表，因而得名为提丢斯－波得定则。可表述为：从离太阳由近到远，对应于第几个行星(水星不取1，而取$-\infty$)，其到太阳的距离为：$a_n=0.4+0.3\times2^{n-2}$(天文单位)。表3-2给出的是按提丢斯－波得定则计算的结果和实测结果的比较。

表3-2 行星到太阳的距离(AU)

行星	提丢斯－波得定则计算的距离	n取值	观测值
水星	0.4	$-\infty$	0.39
金星	0.7	2	0.72
地球	1.0	3	1.00
火星	1.6	4	1.52
(谷神星)	2.8	5	2.77
木星	5.2	6	5.20
土星	10.0	7	9.56
天王星	19.6	8	19.19
海王星	38.8	9	30.07
(冥王星)	77.2	10	39.46

由上表可见，前五颗大行星计算的结果和实测结果两个值最为接近，土星和天王星也较接近，海王星和冥王星相差甚远。有趣的是，提丢斯－波得定则的提出，导致了小行星带的发现。按照该定则，火星和木星轨道之间(距太阳2.8个天文单位处)应该有一颗大行星，但在当时已发现的大行星中却没有在此位置的，于是天文学家将天文望远镜对准距太阳2.8AU左右的天区，于1801年元旦之夜，在距太阳2.77天文单位处发现一颗行星，但体积、质量都很小，继续寻找大行星没有结果，却陆续发现众多的小行星，称之为小行星环带(图3-6)。

五、行星的视运动

早期的天空观测发现，恒星的相对视位置几乎没有什么变化，至少在几十年,甚至上百年内看不出明显的变化。但行星不同,相对于恒星为背景的天空有明显的移动,这就是行星的视运动。

1. 行星视运动的特点

行星视运动的轨迹集中在黄道两侧很狭窄的区域内,这个区域称为黄道带;它们的运行方向,总体上体现出它们绕太阳公转的方向即自西向东(赤经增加),显然与太阳周年视运动方向一致,称为“顺行”(图 3-8);但有时也会在短时间内自东向西运行(赤经减小),显然与太阳周年视运动方向相反,称为“逆行”,然后又转为自西向东。运行方向变化的转折点称为“留”。如果将某行星一年中在不同时刻的视位置绘制在星图上,就可以得到其视运动的轨迹(图 3-8)。行星视运动具有周期性,各行星视运动周期各不相同。

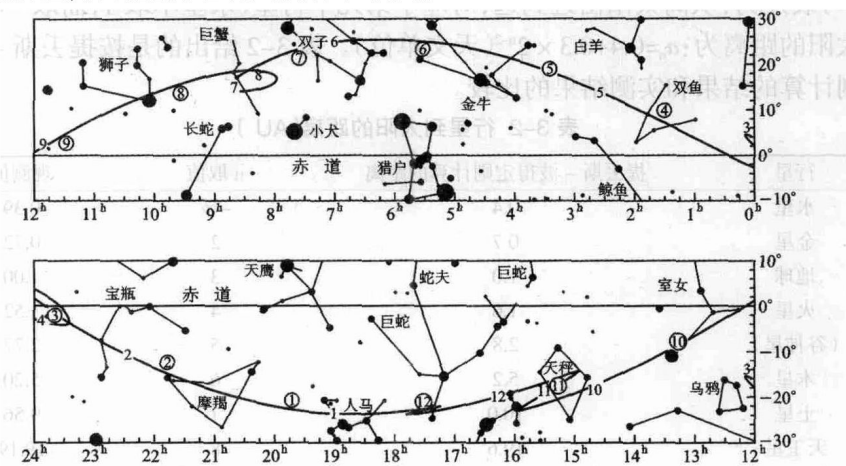



图 3-8 行星视运动轨迹

2. 行星视运动的解释

如何解释行星这种视运动是建立宇宙模型(如地心说、日心说)不能回避的事实。托勒密所代表的地心说的核心内容是:地球是宇宙的中心静止不动,所有天体都直接或间接绕地球公转。为了解释行星的视运动而设计了一种叫做本轮和均轮的模式(图 3-9)。哥白尼所代表的日心说的核心内容是:太阳是宇宙的中心,所有天体都绕太阳公转,而天体东升西落的这种周日运动实际上是地球自转的反映;周年运动则是归之于地球绕太阳的公转。行星相对于恒星的视运动上述特点,是由于地球和各行星绕太阳运行角速度有差异的结果(图 3-10),这一点揭示了行星相对于恒星的视运动的实质。

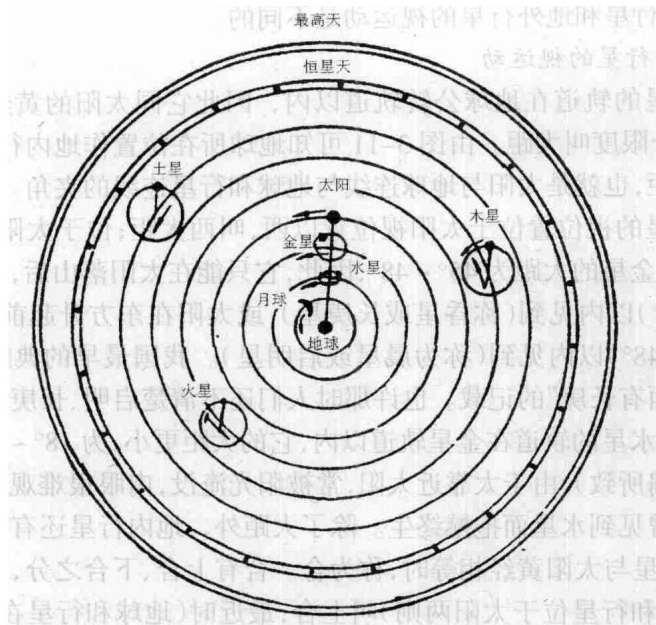



图 3-9 地心说宇宙体系模型

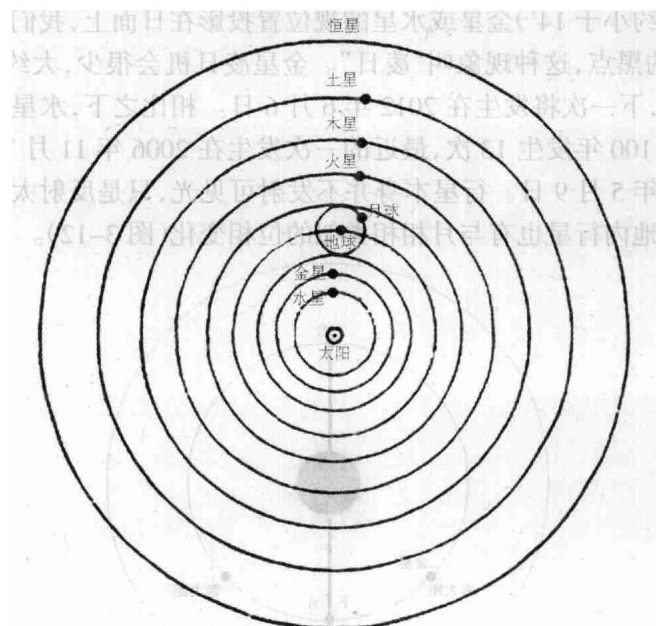



图 3-10 日心说宇宙体系模型

我们观测行星的视运动是在地球上进行的，因此，地球绕太阳公转轨道以内的行星，我们称之为地内行星，地球绕太阳公转轨道以外的行星，我们称之为地

外行星，地内行星和地外行星的视运动是不同的。

(1) 地内行星的视运动

地内行星的轨道在地球公转轨道以内，因此它同太阳的黄经差被限定在90°以内，这个限度叫大距。由图 3-11 可知地球所在位置作地内行星轨道切线，切点处为大距，也就是太阳与地球连线与地球和行星连线的夹角。有两个夹角，如果地内行星的视位置位于太阳视位置以西，叫西大距；位于太阳视位置以东，则叫东大距。金星的大距为 45° ~ 48°，因此，它只能在太阳落山后，在西方地平以上 45°(或 48°)以内见到(称昏星或长庚星)，或太阳在东方升起前，在东方地平以上 45°(或 48°)以内见到(称为晨星或启明星)。我国最早的典籍《诗经》就有“东有启明，西有长庚”的记载。也许那时人们还不清楚启明、长庚实则是同一颗星——金星。水星的轨道在金星轨道以内，它的大距更小，为 18° ~ 28°(水星的轨道较金星更扁所致)，由于太靠近太阳，常被阳光淹没，肉眼很难观测到。哥白尼就因一生未曾见到水星而抱撼终生。除了大距外，地内行星还有两个特别的位置，即地内行星与太阳黄经相等时，称为合。合有上合、下合之分，当行星与地球最远时(地球和行星位于太阳两则)叫上合，最近时(地球和行星在太阳同侧)叫下合。“合”时行星与太阳同升同落，我们无法见到它们。但是在下合附近，若离黄道面很近时(约小于 14′)金星或水星的视位置投影在日面上，我们可以看到日面上由此形成的黑点，这种现象叫“凌日”。金星凌日机会很少，大约每 243 年有 2 组，每组 2 次，下一次将发生在 2012 年 6 月 6 日。相比之下，水星凌日的次数要多些，大约每 100 年发生 13 次，最近的一次发生在 2006 年 11 月 7 日，下一次将发生在 2016 年 5 月 9 日。行星本身并不发射可见光，只是反射太阳光才被我们所看到，因此地内行星也有与月相相类似的位相变化(图 3-12)。

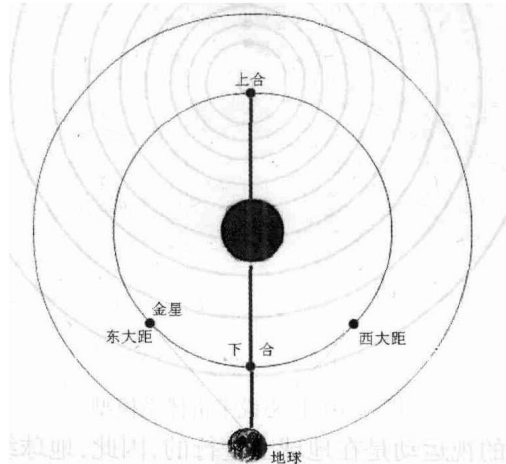



图 3-11 地内行星的会合运动

由图 3–11 可知，地内行星在下合前后会出现逆行，地内行星出现逆行是由于地内行星公转角速度大于地球公转角度所致。在地球上看地内行星视运动的过程为：

上合 —顺行→ 东大距 —顺行→ 留 —逆行→ 下合 —逆行→ 留 —顺行→ 西大距 —顺行→ 上合

$d = 58''$　　$d = 58''$　　$d = 51''$　　$d = 42''$　　$d = 31''$

$d = 24''$　　$d = 18''$　　$d = 15''$　　$d = 12''$　　$d = 10''$

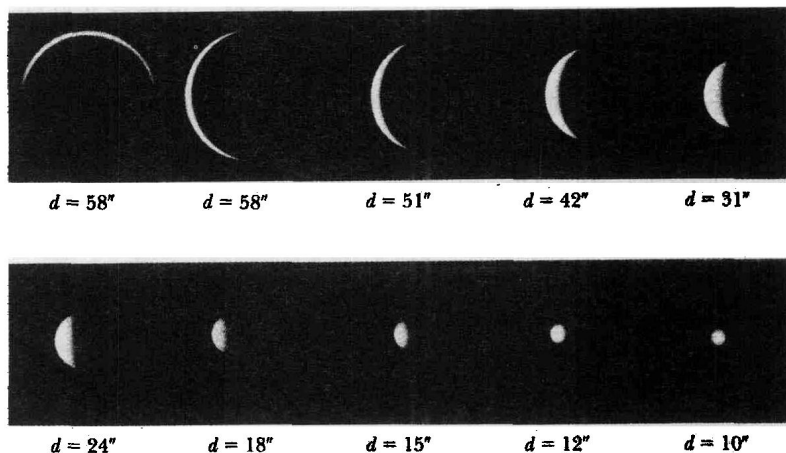



图 3–12 金星的位相变化

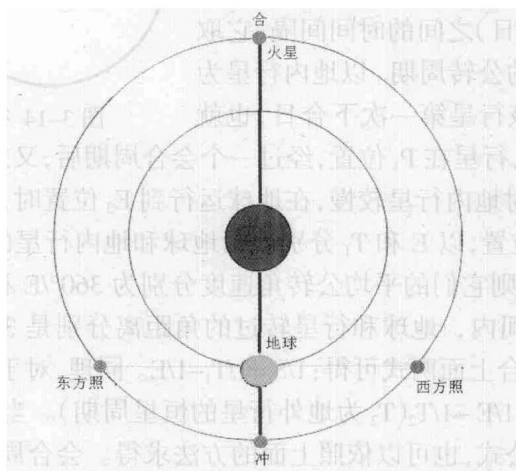



图 3–13 地外行星的会合运动

（2）地外行星的视运动

地外行星轨道在地球公转轨道之外，因此它同太阳的黄经差可以是 0°～360°之间的任何值。由图 3–13 可知，地外行星在绕太阳一周过程中，亦有类似于地内行星的特殊位置：当行星与太阳黄经差为 0°时称为“合”，合时离地球最远（即行星与地球在太阳两侧），合时行星与太阳同升同落，我们无法见到；当行星与太阳黄经差为 180°时称为“冲”，冲时距地球最近（即行星与地球在太阳同侧），

冲时行星与太阳此升彼落，整夜可见，此时是最佳观测时期。当行星与太阳的黄经差为90°时（即过地球所在位置作地球轨道切线，切线与地外行星轨道的两个交点），称为方照，行星视位置在太阳视位置以东时叫东方照，在以西时叫西方照。东方照时上半夜可在西方天空见到，西方照时下半夜可在东方天空见到。

由图3-13可知，地外行星在冲日前后会出现逆行。根据开普勒第三定律，与地球相比，地外行星公转半长径较长，因而公转周期也长，公转角速度就小，地外行星出现逆行是由于地外行星公转角速度比地球公转角速度小所致。

在地球上看，地外行星视运动的过程为：

合 $\xrightarrow{\text{顺行}}$ 西方照 $\xrightarrow{\text{顺行}}$ 留 $\xrightarrow{\text{逆行}}$ 冲 $\xrightarrow{\text{逆行}}$ 留 $\xrightarrow{\text{顺行}}$ 东方照 $\xrightarrow{\text{顺行}}$ 合

地外行星中，火星和天王星有位相变化，其余的看不出位相变化。

(3) 行星的会合周期

行星都绕太阳公转，由于轨道半径的差异，决定它们绕太阳公转速度不同，也就有了行星与地球的复合运动，表现为它们对于太阳的会合运动。会合运动是一种周期现象，因而也就有所谓的会合周期，即行星连续两次合日（或冲日）之间的时间间隔，它取决于行星和地球的公转周期。以地内行星为例（图3-14），当该行星第一次下合日，也就是地球在 E_1 位置，行星在 P_1 位置，经过一个会合周期后，又发生第二次下合日。由于地球公转相对地内行星较慢，在地球运行到 E_2 位置时，行星已经绕太阳一周还多，到达 P_2 位置，以 E 和 T_1 分别表示地球和地内行星的恒星周期，S 代表行星的会合周期，则它们的平均公转角速度分别为 360°/E 和 $360°/T_1$，那么在一个会合周期的时间内，地球和行星转过的角距离分别是 $360°S/T_1 = \theta$ 和 $360°S/E=360°+\theta$，综合上面两式可得：$1/S = 1/T_1 - 1/E$。同理，对于地外行星也可以得到类似公式：$1/S = 1/E - 1/T_2$（T_2 为地外行星的恒星周期）。当然任何两个其它的行星的会合周期公式，也可以依照上面的方法求得。会合周期公式还表明一个事实，即两行星的公转周期相差愈大，它们的会合周期愈短；反之则愈长。如水星、金星和木星的公转周期分别为88日、225日和11.9年，水星与金星的会合周期约为144.5天，水星与木星的会合周期约为89.8天。实际应用中常常是通过观测获知某行星会合周期，然后求知其绕太阳公转的恒星周期。

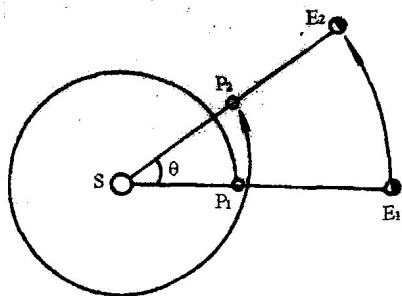



图3-14 行星的会合周期

六、太阳系的起源和演化

太阳系的起源和演化是指太阳系在何时、由何形态物质、何种方式、经历何

种过程、用了多长时间形成的,是何原因产生太阳系的现有特征和各类天体的。这方面的研究可追溯到17世纪中叶,尽管最初的研究结论科学价值不大,但拓展了一个研究新领域和震撼了上帝创世的宗教势力这两方面是应该肯定的。

太阳系起源的假说有数十种之多,但大致以形成先后、行星的物质来源和行星的形成方式分为两大类。

1. 先后形成说

主张太阳形成在先,行星及其卫星等形成在后。最著名的有灾变说和俘获说。

(1) 灾变说

灾变说认为,行星物质是因某一偶然事件从早已形成的太阳中分离出来的,后来逐渐形成行星和卫星。第一个灾变说是法国动物学家布丰于1745年提出的,他认为太阳形成后有一巨大彗星掠碰太阳边缘,使太阳旋转,同时从太阳拉出一些物质,也绕太阳旋转,并最后形成行星等。20世纪初,美国地质学家张伯伦和天文学家摩尔顿认为太阳形成后的某个时候,有一颗恒星运行到离太阳几百万km附近时,由于引力作用使太阳正面和反面形成巨大的潮,并向恒星离去的方向同向旋转,这些"潮"中的物质,在形成星子后,最终形成行星和卫星(亦称星子说)。1916年英国天文学家金斯提出,太阳形成后,一巨大恒星在太阳附近的地方掠过并远离后,它的引力从太阳中拉出一个如雪茄烟的长条物质,并按恒星远离的方向旋转,这些物质随后形成行星和卫星(又称潮汐说)。此外还有"碰撞说"、"超新星说"等,也都属于灾变说范畴。

灾变说主要意图是以外来因素解释太阳系角动量分布异常问题。殊不知,银河系里恒星的空间密度很小,平均每35立方光年体积才有一颗恒星,因此,出现上述"灾变"的可能性极小。另外,近年来已在太阳系之外发现有多颗行星,可见行星在宇宙中的存在并非罕见,很可能是普遍现象。因此太阳系形成于某次极偶然的"突变"是不能成立的。

(2) 俘获说

俘获说认为,太阳从银河系或者恒星际空间俘获物质形成围绕太阳的原始星云,然后逐渐聚集成行星和卫星。苏联地球物理学家施密特1944年提出:太阳形成后(几十亿年前)在绕银河系转动时,进入一个直径约10光年与太阳相对速度为每秒5km的星际云,并俘获其中的部分物质,这些物质在随后的漫长时间逐渐形成行星和卫星。这种学说也是建立在偶然性基础上,缺乏科学依据。

2. 共同形成说

共同形成说认为:整个太阳系中所有天体都形成于同一个星云。星云中心部分的物质演化后形成太阳,星云外围直到边缘的物质演化后形成行星和卫星,亦

即太阳和行星是同时形成的。最著名的就是星云说，而最具代表性、也是较早的科学的天体演化学说则是康德－拉普拉斯星云说。

德国哲学家康德于1755年在《自然通史与天体论》一书中论述了太阳系起源的星云说，其要点是：太阳系内一切天体都由同一个原始星云按照客观规律(即万有引力定律)逐步演变而成的。这个原始星云开始很稀薄，并由大小不等的固体微粒组成。由于自引力的作用，质点以小附大，逐渐形成更大的团块，引力也就更强，天体也就在吸引力最强的地方开始形成。于是在星云的中心部分集聚较多的物质形成原始太阳。星云外围的物质在星云中心引力下向中心运动，沿途与其它质点碰撞而改变方向，变成围绕星云中心的圆周运动，其间又形成几个引力中心，这些引力中心吸集周围的物质逐渐形成行星。

法国数学家和力学家拉普拉斯1896年在《宇宙体系论》一书的附录中提出关于太阳系起源的星云说，其要点是：太阳系所有天体形成于一团巨大的、灼热的转动着的球状星云。星云冷却逐渐收缩，并且转速加快，惯性离心力增大，使星云渐变扁平状。当离心力与引力相等时，物质在星云盘中的位置相对稳定，形成一个个绕中心转动的气体环，再经长期演化，这些环中物质由于引力作用以小附大，最后形成一个个行星，较大的行星冷却收缩时，可能分离出一些小气体环，后来形成卫星。星云盘中心部分则收缩并吸集大量物质形成太阳。

康德和拉普拉斯所提出的星云说的主要观点基本一致。因而通常合称为康德－拉普拉斯星云说。康德－拉普拉斯星云说摒弃了“神”的力量，运用万有引力定律从数学和力学上加以论述，这种思路及有些观点是完全正确的，有些预言也已被证实。另外，它还能够说明行星运动的一些特征，如共面性、同向性、近圆性、行星的自转及卫星绕行星的转动等。但也有不少缺点和错误，比如没有说明太阳系角动量分布异常问题，逆行卫星等。另外，拉普拉斯星云说中，关于星云开始炽热以后逐渐冷却的观点与现今的观测事实不符。

太阳系诞生以来，已经历大约50亿年，太阳由于持续的热核反应，每秒钟约430万吨的物质在聚变中损失掉，如果以目前的速度稳定持续进行下去，那么，总有一个时候，太阳会由量变(指质量减少)导致质变，太阳也就不复存在。有人估算，大约50亿年之后，当太阳内部的氢核燃料都燃烧成了氦以后，壳层的氢开始燃烧，这时太阳的体积开始膨胀而成为红巨星。此后进一步膨胀演化成一颗致密的白矮星，最后演化为冰冷、静寂的黑矮星。

第三节　行星分类与行星简介

除太阳外行星是太阳系最重要的天体。“行星”一词起源于希腊文 planetes，

意为“漫游者”，因为与相对固定的恒星位置相比，它们的位置总是有变化，而且以比较复杂的方式变化着。至于什么是行星？传统上认为是绕恒星运行、自身不会发可见光的天体。2006年8月，国际天文学联合会决议给出了行星的严格定义：位于围绕太阳公转的轨道上；有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的形状（近于球体）；已经清空了其轨道附近的区域。同时还定义了“矮行星”：除了具有行星的前两个性质外，还具有没有完全清空其轨道附近的区域和不是卫星的特点。

根据上述定义，太阳系主要天体除太阳处，还有大行星（水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星）、矮行星（如冥王星）、卫星及除此之外所有天体即小天体（小行星、彗星和流星体）。

一、行星的分类

根据行星质量、大小、化学组成、轨道位置可将行星作如下分类：

1. 以地球公转轨道为界

在地球轨道以内的叫地内行星，有两颗：水星和金星；在地球轨道以外的叫地外行星，有五颗：火星、木星、土星、天王星和海王星。

2. 以小行星带为界

在小行星带以内的叫内行星，有四颗：水星、金星、地球和火星；在小行星带以外的叫外行星，也有四颗：木星、土星、天王星和海王星。

3. 以物理性质和化学组成

类似于地球的叫类地行星，内行星都是类地行星；类似于木星的叫类木行星，外行星都是类木行星。

4. 依体积

木星和土星的体积很大，因而称为巨行星。

5. 依到太阳距离

天王星、海王星距太阳很远，因而被称为远日行星。

另外，冥王星算不上大行星。按国际天文联合会的定义，它应该是一颗矮行星，还由于它的轨道主要在海王星之外，因而称它为海王星之外天体，简称海外天体或海外行星。以后若在冥王星之外发现太阳系的新行星，也应归入海外天体。各行星的主要参数见表3-3。

八大行星的特点还表明，所有的类木行星都有光环。而水星、金星和火星则没有观测到光环。

表 3-3 太阳系行星表

	轨道半长径（天文单位）	公转周期	轨道偏心率	轨道倾角（度）	自转周期	赤道与轨道交角	赤道半径（km）	质量（地球=1）	体积（地球=1）	密度（水=1）	卫星数目（颗）·光环
水星	0.387	88 日	0.206	7.0	58.6 日	<28°	2440	0.0554	0.056	5.46	0·无
金星	0.723	225 日	0.007	3.4	243 日	117°	6050	0.815	0.856	5.26	0·无
地球	1.000	1 年	0.017	0	23 时 56 分	23°26′	6378	1.00	1.00	5.52	1·无
火星	1.524	1.88 年	0.093	1.9	24 时 37 分	23°59′	3395	0.1075	0.150	3.96	2·无
木星	5.205	11.9 年	0.048	1.3	9 时 50 分（赤道）	3°05′	71400	317.94	1316	1.33	61·有
土星	9.576	29.5 年	0.055	2.5	10 时 14 分（赤道）	26°44′	60000	95.18	745	0.70	31·有
天王星	19.28	84 年	0.051	0.8	17.2 时	97°55′	25900	14.63	65.2	1.24	24·有
海王星	30.13	165 年	0.006	1.8	16.1 时	28°48′	24750	17.22	57.1	1.66	11·有
冥王星	39.87	248 年	0.256	17.1	6.39 日	>60°	1350	0.0024	0.009	1.50	1

二、太阳系行星的运动特征

所有行星既有绕太阳的公转也有绕自身旋转轴的自转。行星公转的轨迹就是它们的公转轨道。

1. 行星的轨道要素(亦称轨道根数)(图 3-15)

轨道半长径(α):行星公转轨道都是椭圆,因而有所谓的半长径,它表示到太阳的平均距离,亦即轨道的大小。

轨道偏心率(e):是椭圆轨道半焦距(c)与半长轴(α)的比值。它是表示行星轨道扁平程度即椭圆形状的参数之一。

轨道倾角(i):指行星轨道平面与地球公转轨道所在平面(即黄道面)的交角,可表示行星轨道相对于地球轨道的空间位置。

升交点黄经(Ω):行星公转轨道在天球上的投影与黄道有两个交点,其中行星视运动从黄道以南运行到黄道以北(即行星日心黄纬由负变正)所经过的交点,叫升交点。升交点黄经是指升交点从春分点起算的日心黄经,它表示升交点相对于黄赤交点之一春分点的位置。

近日点角距(ω):近日点角距是升交点到近日点两个向径的夹角,它决定椭圆长轴的方向。

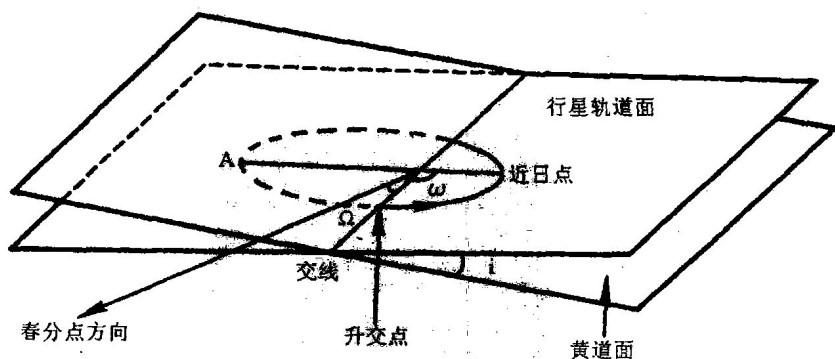



图 3-15 行星的轨道要素

行星过近日点的时刻(τ):常用行星任意一次过近日点的时刻作为计算行星在轨道上位置的初始时刻。

根据以上 6 个要素可以决定行星在任何时刻的位置。其中前 5 个决定轨道椭圆的空间位置,最后一个决定行星在某一时刻在轨道上的位置。

2. 运动特征

八大行星的运动除了要遵从前面所提到的开普勒三大定律外,还有以下一些特点:一是,八大行星绕太阳公转轨道几乎都在一个平面上,以地球公转轨道

即黄道为参考，其它行星轨道与其夹角一般都小于2°10′，只有水星最大为7°，这在天文学上称为轨道运动的共面性。由此我们可以确定，寻找大行星只能在黄道两侧7°的范围内。二是，行星绕太阳公转的方向都相同即自西向东，这在天文学上称为轨道运动的同向性。三是，根据开普勒三大定律，行星公转轨道都是椭圆，但大多数行星的轨道偏心率都很小，除水星为0.20563外，其余的都小于0.1。也就是说，行星的公转轨道接近正圆，这表明了轨道运动的近圆性。

上述行星轨道运动的三个特征对于太阳系起源的假说是一个前提条件，也就是说，任何关于太阳系起源的假说都必须首先要能解释上述三个特征。

三、八大行星

按照新的定义，太阳系只有八大行星：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。它们都各具特征。

1. 水　星

(1) 水星的整体特征

水星(图3-16)，我国古代称辰星，是距太阳最近的大行星，轨道半长径5791万km(0.387AU)，它与太阳的最大黄经差(即大距)在18°~28°之间。由于太靠近太阳，平时很难观察到，最亮时的视星等为-1.9等。水星是八大行星中最小的行星，半径仅为2 440km，约为地球半径的38.3%；体积是地球的5.62%；质量为3.33×10^{23}kg，仅为地球质量的0.0558倍；平均密度较大，为5.44g/cm^3，仅次于地球的平均密度。其化学成分和内部结构与地球相似。

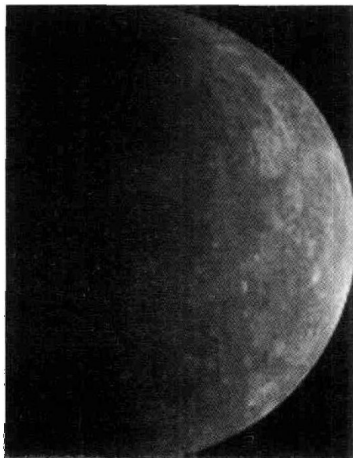



图3-16 水　星

水星的重力很小，只有地球的1/5，其逃逸速度也很小，为4.3km/s；水星的反照率为6%；水星有比较强的磁场，是偶极磁场。水星没有卫星。

（2）水星的表面特征

水星表面与月球表面十分相似，有山脉、平原、盆地、裂谷和悬崖，有多集中于平原区的环形山，还有因冷却和收缩而形成的大的皱纹，这可能是流出的熔岩。水星表面众多特征表明，水星表面没有受到风化的影响。

由于水星离太阳很近，白昼时间很长，加上水星的重力小、逃逸速度小，因而水星表面的大气非常稀薄，气压小于 2×10^{-9}hPa。水星大气中含有氢、氦、氧、碳、氩、氖和氙等元素。由于离太阳近和空气稀薄，水星上白天温度很高可达 600K ~ 700K，这一点也是水星表面大气稀薄的原因。而夜晚温度仅为 100K ~ 150K。昼夜温差如此之大以及其它恶劣条件，至今未发现有生命存在。

（3）水星的运动特征

水星的公转轨道是八大行星中最扁的，偏心率为 0.206；轨道倾角为 7°，公转周期为 87.969 天，会合周期为 115.88 日。每天公转角速度大约为 4°，线速度 47.89km/s，是太阳系中运行速度最快的行星，公转方向自西向东。水星在公转的同时也在自转，自转周期为 58.646 天，是公转周期的 2/3，即水星每自转三周所需的时间，等于它绕日公转两周的时间，也就是说，水星的一年的时间等于它的一天半的时间。自转的方向也是自西向东。

水星的轨道面与其赤道面交角不到 3°，小于地球同类角（23°26′）。水星近日点有进动现象，观测值（5601″）比理论计算值（5558″）每 100 年多 43″，被称为反常进动，这可用爱因斯坦广义相对论予以解释。

当水星在下合，位于黄道两侧 16′以内时，在地球上看，它的视位置不是在天球上而是落在太阳上，这就是水星凌日现象。

2. 金　星

（1）金星的整体特征

金星（图 3-17）古代民间称“太白星”，它绕太阳公转轨道半长径为 1.082×10^{8}km（0.723AU）。它与太阳的最大黄经差（即大距）在 45° ~ 48°之间。由于离太阳比较近，我们只能在日出前的东方天空或日落后的西方天空有可能看到，因而我国古代称之为启明星和长庚星。金星的半径为 6 070km，略小于地球；质量为 4.87×10^{24}kg，是地球质量的 0.815 倍；平均密度为 5.2g/cm³，比水星和地球都小。其化学组成与地球相似，内部是一个半径 3 100km 的铁镍核和以硅、氧、铁、镁等化合物组成的幔，外层是硅化物组成的壳。

金星的逃逸速度约为 10.3km/s。它的反射率应该比较大，加上它距地球近，体积比水星大，因而是天空中除太阳、月球外第三个最亮的天体，最亮时的视星等为 -4.4 等。比著名的天狼星还亮 14 倍。金星基本没有磁场，也未发现有辐射带。

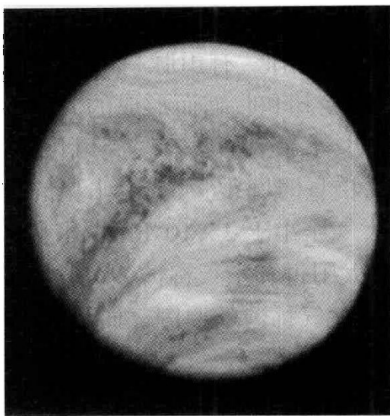



图 3-17 金 星

(2) 金星的表面特征

金星表面比较平坦,但也有陨石坑和火山口,还有悬崖和高山,有类似于月海的很大的平坦区,表面岩石有风化现象。金星上最突出的特征是有浓密的大气,对金星有一定的保护作用,大气中 CO_2 的含量在 90%以上,低层可达 99%,此外还有少量的氮、氩、一氧化碳、水蒸汽等。在大气中有流酸雾形成的"云",还有频繁的闪电现象。金星大气压相当高,大约是地球 90 ~ 100 倍。由于二氧化碳含量多,二氧化碳可使太阳辐射到达金星表面,而使金星表面辐射不能散失,起重要温室效应。所以,金星表面的温度高达 738 ~ 758K,白天和夜晚的温度应该有所不同。由于温度高、气压大、严重缺氧等,自然环境严酷,金星上不可能有任何类似地球的生物。

(3) 金星的运动特征

在八大行星中,金星的公转轨道最接近正圆,偏心率为 0.007,轨道倾角较大为 3°23′40″,仅次于水星。公转周期为 224.7 日,公转会合周期为 583.9 日,公转角速度约为每日 1.6°,线速度约为每秒 35km。它的公转轨道面与赤道面夹角为 177.4°,即其自转轴与轨道面只有 2.6°,也就是说,它基本上是"躺"在轨道面上绕太阳公转,公转方向自西向东。金星在公转的同时也在自转,金星的自转比较特殊,自转方向与公转方向相反,即自东向西自转,是太阳系中唯一逆向自转的大行星,如果在金星上看太阳,太阳从西边升起,在东边落下。金星自转很慢,周期约为 243 日。金星上的一昼夜相当于地球上的 117 日,也就是,金星上昼、夜长度各略短于 59 日。金星没有卫星。

3. 地 球

(1) 地球的整体结构

地球(图 3-18)是人类居住的星球。到太阳的距离为 1.496 亿千米,即 1AU。

地球的平均半径为 6 371 008m,扁率为 1/298.257,体积为 $1.083 \times 10^{12}km^3$,质量为 $5.976 \times 10^{24}kg$,大约是太阳质量的 33 万分之一,平均密度为 $5.52g/cm^3$。主要组成物质为:硅、铝、镁、铁、镍、碳、氧等。

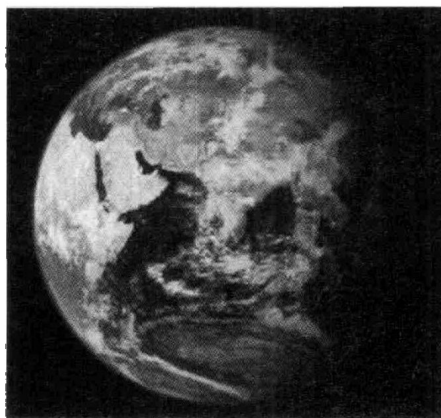



图 3-18 地 球

地球的重力加速度为 $980.6cm/s^2$,逃逸速度为 11.2km/s。地球反照率较大,约为 30%,地球有较强的磁场,地球表面的磁场强度为 5×10^{-5} 特斯拉,属偶极磁场。地球有一颗天然卫星——月球。

(2) 地球的表面特征

地球的内部分地核(又分内核和外核)、地幔和地壳。地球表面主要是陆地和海洋,前者既有高山、平原、丘陵、盆地,又有河湖和冰川,在地理学上,还可分岩石圈、水圈、生物圈和大气圈等四个圈层。其中大气圈又可分对流层、平流层、中间层、电离层和散逸层等五个圈层。地球大气主要由氮、氧、氩、二氧化碳和水汽等组成。

地球近地面大气的平均温度为 288K,地球表面的平均温度略高于此值。昼夜温差不大。气压值平均为 1 013.25hPa。

当然,地球表面最重要的特征是:生存有大量生物,特别是智慧生物——人类。这是现今所知太阳系中仅有的现象。

(3) 地球的运动特征

地球的运动十分复杂,由十多种运动叠合而成。其中自转和公转是最主要最基本的运动。地球公转方向自西向东,公转周期为 365.2564 日(1 恒星年),公转角速度平均为 59′/ 日,公转线速度平均约为 30km/s。地球在公转同时还以相同的方向自转,自转一周定义为一日;也就是说地球在绕太阳公转 360°过程中,地球自转 365.2564 周。地球自转角速度为 15°/h,自转线速度因纬度而异(有关地球更详细和具体的内容见第二章第一节)。

4. 火　星

(1) 火星的整体特征

火星(图 3-19)是一颗红色的星,我国古代称之为“荧惑”。火星轨道半长径为 2.07×10^8km,约合 1.38AU;由于它是地外行星,因此它与太阳的黄经差不像水星、金星被限定在一定的角度内,而是 0° ~ 360°。火星比地球小,半径为 3 395km,约为地球半径的 0.53 倍,可以推算,体积为地球体积的 15%;质量为 6.42×10^{23}kg,只有地球质量的 10.8%。进而可推算其平均密度为 3.96g/cm³,小于地球的密度,在类地行星中是最小的。火星的化学组成与地球类似,主要有硫、铁、硅、镁、铝等元素。

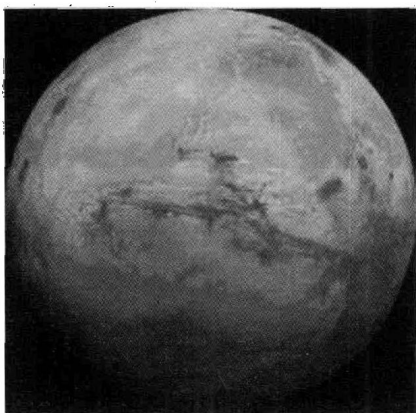



图 3-19 火　星

火星表面重力不及地球的五分之二;逃逸速度为 5km/s。火星有微弱的磁场和 2 颗卫星。

(2) 火星的表面特征

火星表面区域差异较大,大致以与赤道成 30°的大圆为界,南半部比较古老,表面崎岖且布满环形山;北半部以火山熔岩平原为特征,平原内散布一些死火山;北半部环形山少于南半部。火星表面平坦区布满沙尘和岩块。火星上还有类似于“河床及其支流系统”的地形,有人据此认为,火星上曾经有水,也表明火星曾遭侵蚀。最引人注目的是:火星两极地区有白色极冠,类似于地球两极的极冰,且随季节而有变化,有此长彼消的规律,极冠由水冰和干冰(固态二氧化碳)组成。

火星上也存在大气,但远比地球大气稀薄,火星大气的主要成分是二氧化碳,占 95%,氮占 3%,另外还有少量的氩、一氧化碳和水汽。火星表面的大气压为 7.5hPa,仅为地球表面大气压的 0.5% ~ 0.8%。火星大气中也飘浮着云,云的主要成分是二氧化碳和水。火星大气还有一个重要特征——尘暴,它是由火星低层

大气中裹挟尘粒的风构成的。

火星的昼夜温差很大，白天赤道附近最高温度可达 293K，由于火星大气稀薄，保温作用差，晚上的温度可降到 193K，两极温度更低，最低可达 134K。

火星与地球最为相似，因此火星上有无生命现象引起地球人的极大关注，经过长时期探索，目前还没有发现有生命的迹象。但人类仍在坚持不懈的努力，对火星作更深入的研究，以解决能否向火星移民以及相关的一系列问题。

（3）火星的运动特征

火星的公转轨道较扁，偏心率为 0.093，在八大行星中，仅次于水星，由于偏心率较大，近日点到太阳的距离为 2.07×10^8km，约合 1.38AU；远日点 2.49×10^8km，约合 1.67AU。由于这种远近的变化，及其与地球距离的不断变化，其亮度也在不断变化，最亮时视星等为 -2.9 等，最暗时为 1.5 等。周期为 686.98 日，公转线速度为 24.13km/s，公转方向自西向东。赤道面与轨道面交角为 23°59′，即自转轴与其轨道面的倾角约为 66°01′，与地球的同类角相似，因此火星上中高纬度也有类似于地球的四季变化。火星在公转的同时还在自转，自转周期为 1.025957 天，即 24.6 小时，也与地球的自转周期相近，因而其昼夜交替与地球也十分相似。

5. 木　星

（1）木星的整体特征

木星（图 3-20）古代称“岁星”，是八大行星中最大的一颗，因而称为巨行星。其赤道半径为 7.14×10^4km，是地球的 11.2 倍；极半径为 6.69×10^4km；体积大约是地球的 1 316 倍；质量约为 1.9×10^{27}kg，是地球的 318 倍；平均密度为 1.33g/cm³，比地球平均密度小得多；木星的扁率为 0.0648，是仅次于土星的较扁的行星。木星的化学成分主要是氢和氦。

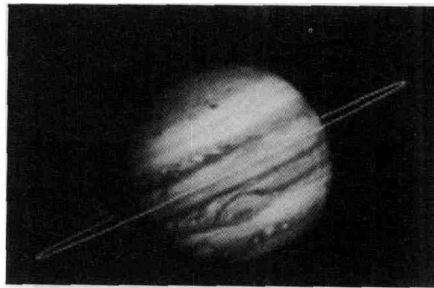



图 3-20 木星及其光环

木星的重力较大，逃逸速度为 59.5 km/s，大约是地球的 5.5 倍。木星的巨大体积和较高的反照率，使木星成为夜空中仅次于月球和金星的明亮天体。木星的磁场很强，也是一个偶极磁场，表面磁场强度是地球的 10 倍，而核心区则是地球

的 1.75 万倍，木星还有一个很强的类似于地球的辐射带。

(2) 木星的表面特征

木星浓密的大气下是液氢的海洋，它与类地行星完全不同，是一个液体行星，没有固体的表面。木星表面最突出的特征是南半球有一个长 2.2 万千米，宽 1.3 万千米的“大红斑”(图 3-21)，1665 年发现至今，大小虽有变化，但已存在 300 多年。据探测，它是木星云层中的一个特大旋涡，以逆时针方向旋转，内部处于剧烈的运动状态。另外一个特征是木星上有许多不同颜色的斑纹和平行赤道的暗带和亮带，是木星大气中的云。木星大气的化学成分有氢，占 82%，氦占 17%，此外还有氨、甲烷等。此外木星除反照率外，还以自身的温度向外发射辐射，其发射的能量约为它接受的太阳辐射能的 2 倍。这一点表明，木星处于缓慢的冷却之中。

图 3-21 木星大红斑

经探测，木星内部结构的模型大致为：中心是由铁和硅构成的木星核，温度可达 30 000K，核外面是以氢为主的木星幔，分两层，第一层氢处于液态，其中分子离解为独立的原子，形成导电的流体，厚度约为 46 000km；自第一层外直到木星表面为第二层，厚度约 24 000km，主要由液态分子氢组成。第二层之外是木星的大气，厚度大约为 1 000km。木星表面的有效温度在 105 ~ 125K。1979 年还发现离木星中心约 128 300km 处，有一宽约数千千米的由黑色碎石组成的环(图 3-22)，约 7 小时环绕木星旋转一周。木星有 61 颗卫星。

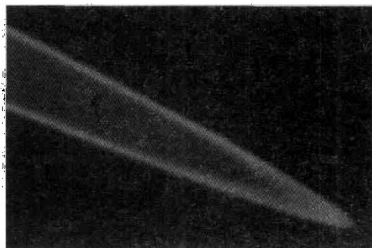



图 3-22 木星光环

(3) 木星的运动特征

木星轨道半长径为 7.7833×10^8km，合 5.203AU，偏心率为 0.048；轨道倾角

1°.3。公转周期为 4 332.71 天，约为 11.86 个地球年，公转线速度为 13.06km/s，公转方向自西向东。木星在公转的同时还有自转，在八大行星中，它的自转速度最快，由于自转快，木星又是流体行星，惯性离心力使星体扁率相当大，达 0.0648，是八大行星中除土星外最扁的星球。赤道部分的自转周期为 9 小时 50 分 30 秒（约合 0.41354 日），木星的自转与太阳自转有共同之处，不同纬度自转速度不同，即较差自转，这一点说明它不会有固体表面。自转方向与公转方向相同。木星的轨道面与其赤道面夹角为 3°.1，和水星差不多，同为八大行星中最小，也就是说，它的自转轴几乎垂直于它的轨道面。

6. 土　星

（1）土星的整体特征

土星（图 3-23）我国古代称为填星或镇星，是仅次于木星的第二大行星，因而也被称为巨行星。土星是最早发现有光环的行星，它的美丽的光环十分引人注目。土星轨道半长径 1.4294×10^9km，即 9.5AU。土星的赤道半径为 6.0168×10^4km，是地球半径的 9 倍，由此可推算它的体积是地球的 745 倍。土星的极半径只有 5.4×10^4km，可见土星较扁，扁率为 0.09，是大行星中最大的，应该是自转较快所造成的。土星的质量为 5.7×10^{26}kg，大约是地球质量的 95 倍。土星的密度为 0.7g/cm^3，是八大行星中最小的。虽然土星的体积大，质量大，但是它的低密度大半径使它表面的重力加速度与地球表面相近。土星的逃逸速度较大，为 35.6km/s。土星的化学组成与木星类似，但氢含量比木星少，甲烷含量比木星多。土星体积较大，因而亮度也比较大，其平均视星等为 0.67 等。土星有很强磁场，且磁场图象十分特殊，磁轴与自转轴仅差 1°，磁极方向与地球的相反，磁心离土星中心约 22.5km。土星也有一个辐射带，强度远比地球辐射带弱。

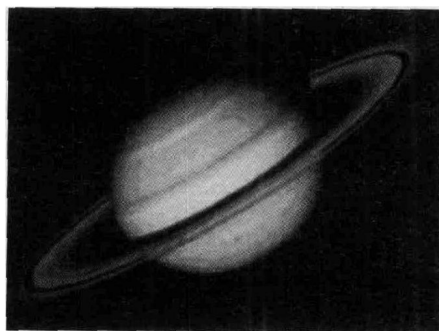



图 3-23 土　星

土星除了有 31 颗卫星外，还有众多光环（图 3-24），土星环实质上是无数个尺度在几米到几百米大小不等的碎冰块、岩石块以及尘埃颗粒组成的在土星赤道面上绕土星旋转的物质系统。光环大致是一些同心圆，从里向外主要有 C 环、

B 环、A 环、F 环和 G 环。各环宽窄不同，最宽的是 B 环，宽约 2.36×10^4km，五个环中最窄的是 F 环，相邻两环间都有空隙，称为“缝”。卡西尼缝较著名，位于 A 环与 B 环之间，宽约 4 800km。实际上，上述较宽的环又由无数个窄的环所组成，有点象高密度的唱片中的密纹。有人认为光环可能是土星的某颗卫星落入洛希极限中所造成的。土星与木星相似，也对外发出辐射，它发射的辐射量是它接受到太阳能量的两倍。

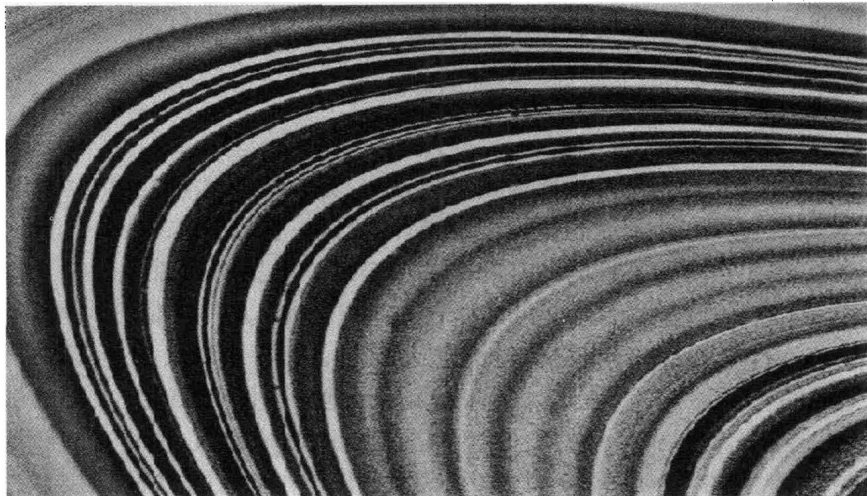



图 3-24 土星光环

(2) 土星的表面结构

土星是“类木行星”，它的表面也是液态的，但是它的中心有一个直径为 20 000km 的岩石核，核外面是厚约 500km 的冰壳，再外面依次是 8 000km 厚的金属氢层和液态分子氢。土星表面有时也会出现明亮的卵形白斑。土星大气以氢、氦为主，并含有甲烷、氨及其它气体。由于土星的表面温度最低达 93K，大气中飘浮的是氨和甲烷等冻结成微小的晶体所构成的云，这就是我们在望远镜中所看到的平行于赤道的条纹，即云带。

(3) 土星的运动特征

土星的轨道半径为 1.4294×10^9km，合 9.54AU，偏心率为 0.056，轨道倾角为 2°19′。公转周期为 10 759.5 日，约合 29.46 年，公转速度约为每秒 9.64km。公转方向自西向东。土星公转同时也在自转，自转角速度随纬度而异，赤道上自转周期为 10 小时 14 分，纬度 60°处为 10 小时 40 分，自转方向自西向东，土星的赤道面与轨道面的交角为 26°44′。

7. 天王星

天王星(图 3-25)是 1781 年英国的音乐教师、天文爱好者 F·W. 赫歇耳用自

制望远镜发现的。在此之前，它至少有 20 次被观测到，但它的运动速度太慢，加之显得很黯淡而被误认为是恒星。

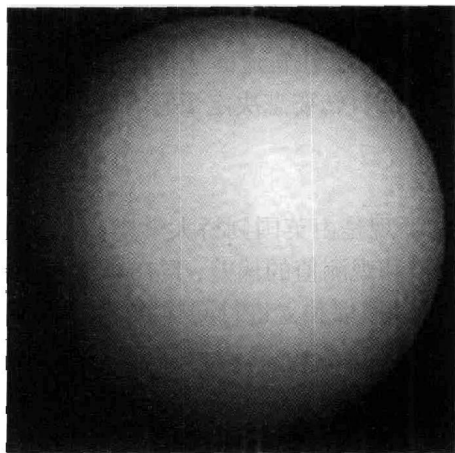



图 3-25　天王星

(1) 天王星的整体特征

天王星的半径约为 2.59×10^4km，大约是地球半径的 4.06 倍；由此推知，体积是地球体积的 65.2 倍，仅次于木星和土星，位居第三；质量为 8.742×10^{25}kg，是地球的 14.63 倍；天王星密度较小，平均为 1.24g/cm^3，在八大行星中，仅比土星略大。天王星扁率为 0.0303，比除木星和土星外的其它行星都略扁些。天王星也有较强的磁场，磁轴与自转轴夹角为 60°，也有类似地球的辐射带。天王星的重力加速度应该比地球大，其逃逸速度为 21.4km/s。由于它离太阳和地球都很远，天王星的视角直径很小，即使在冲日时也只有 4″，视星等约为 6.5 等，肉眼一般难以见到。天王星有 24 颗卫星，1977 年初次发现天王星也有光环，至 1986 年 1 月，发现天王星至少有 10 个光环，光环也是由石头、冰块和尘埃颗粒所组成。光环总宽度约为 7 000km，环本身很窄，只有几十千米，可见环间缝隙很大。

(2) 天王星的表面特征

天王星的表面包围着很厚的大气层，地面观测难以看清。据拍摄到的高分辨率的照片分析表明，表面除了很强的、对称的临边昏暗现象外，没有其它形态特征。据推测，天王星内部很可能有一个岩石和金属铁的核，核外是一个主要是水冰和氨冰的冰幔，幔外是分子氢层，再向外是大气层。天王星厚厚的大气层中还有厚厚的云层，大气的主要成分是氢和氦，还有甲烷分子、氨分子、水分子和氖；云层可能有两个，一个是甲烷云层，一个是氨云层。

(3) 天王星的运动特征

天王星的轨道半径为 2.9×10^9km，约合 19.18AU，因为距太阳很远被称为远

日行星，偏心率为 0.047；轨道倾角为 0°.8，几乎与黄道面重合。公转周期是 30 685 天，约为 84 年，公转线速度为 6.81km/s，公转方向自西向东。天王星在公转的同时也在自转，其赤道面与轨道面的倾角为 97°55′，即自转轴与轨道面夹角为 7°55′，也就是说天王星是“躺”在轨道面上自转的，自转方向自东向西，自转周期为 17.2 时。天王星独特的自转姿态决定了它有与地球完全不同的“昼夜交替”和“季节变化”。

8. 海王星

海王星(图 3-26)的发现是由英国剑桥大学毕业生亚当斯(时年 26 岁)根据天王星位置的理论计算值和观测值的偏差，于 1845 年 9 月由天体力学理论推算出来的。同年夏天法国的勒威耶独立进行同样的研究，并于 1846 年 9 月 18 日将结果告知柏林天文台台长伽勒。9 月 23 日伽勒在计算结果给定的天区，发现了海王星，因而海王星被称为“笔尖下发现的行星”。海王星的发现证明了天体力学理论的正确性，也是天文学上浓墨重彩的一笔。

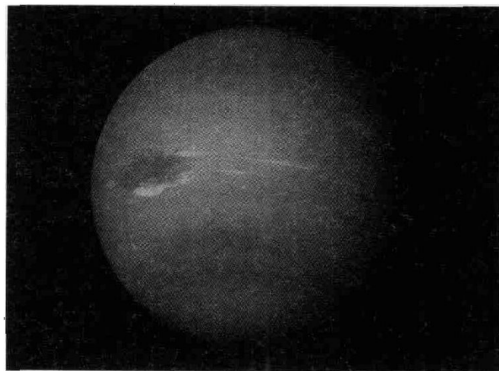



图 3-26 海王星

(1) 海王星的整体特征

海王星是八大行星中距太阳最远的行星，也被称为远日行星。海王星的赤道半径为 24 750km，是地球半径的 3.88 倍，极半径为 24 109km，扁率为 0.0259；体积大约是地球的 57 倍；质量为 1.029×10^{26}kg，是地球质量的 17.22 倍；平均密度为 1.66g/cm^3，小于所有的类地行星，在类木行星中密度最大。其化学组成应与天王星类似。

海王星表面重力加速度比地球略大，赤道上约为 11m/s^2，极地略大，为 11.8m/s^2。海王星表面的逃逸速度为 23.6km/s。海王星的反照率较大为 0.67，但由于距离太远，视直径不到 4″，其亮度也较小，视星等为 7.84 等，肉眼无法见到。海王星的磁场与天王星相似，磁轴相对于自转轴有 46°夹角，偏离海王星中心。海王星有 13 颗卫星，有至少 5 道光环。

(2) 海王星的表面特征

在望远镜里,海王星是一个浅蓝色的圆球状天体,最令人瞩目的是表面有一些亮斑和暗斑,还有一个特别的类似于木星大红斑的"大黑斑"(图 3-27)。大黑斑是逆时针方向运动的气团,其南部还伴有明亮的白斑。海王星较高的反照率表明它有浓密的大气层,因此目前还不能确定其表面形态,据推测,海王星有一个质量和地球质量差不多、由岩石构成的核,核外是质量较大的冰包层,这个冰包层可能是由于它离太阳太远,获得的太阳辐射能少,表面温度低(有效温度只有46k)所致。冰包层之外就是海王星的浓密大气,大气的主要成分是氢,此外还有氦、甲烷等。由于温度极低,海王星上除氨云外,还有甲烷云,云层高速流动,风暴接连不断。

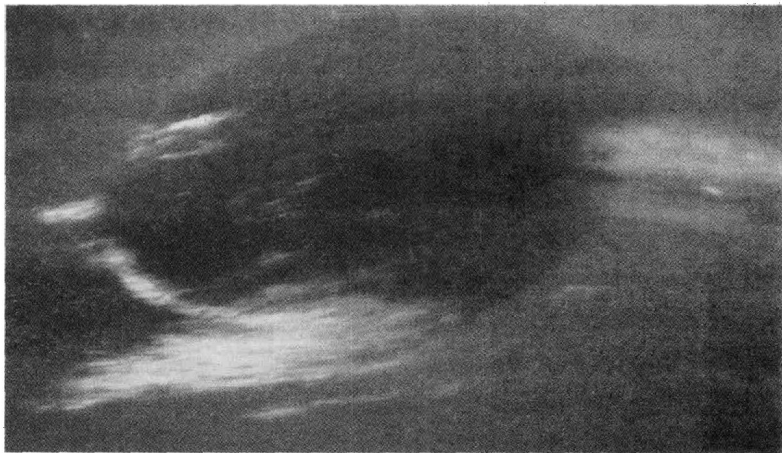



图 3-27 海王星大黑斑

(3) 海王星的运动特征

海王星轨道半长径为 4.5043×10^9km,约合 30.06AU;轨道偏心率为 0.009,在八大行星中较小,仅略大于金星;轨道倾角为 1°.8。海王星的公转周期为 6.019×10^4 日,合 164.793 年,自发现以来还没有完成一周,估计应该在 2011 年才完成一个公转周期。公转线速度为 5.43km/s,平均会合周期为 367.49 日,公转方向自西向东。海王星在绕太阳公转的同时还要自转,且为较差自转,自转方向自西向东,平均自转周期为 16.1 小时,合 0.67125 日,赤道自转周期为 16.5 小时,两极则为 14.2 小时。海王星的赤道面与其轨道面的夹角为 28°48′,比黄赤交角稍大,可见海王星上也有类似于地球的季节变化,只不过,它完成四季变化的一个完整过程,地球已绕太阳公转了大约 165 圈。

9. 冥王星

发现了海王星后,人们又以极大的热情寻找海王星轨道以外的行星,终于

1930 年 3 月 21 日由美国洛威耳天文台的 24 岁青年汤博用照相方法发现了一颗新的行星，称为冥王星(图 3–28)。经计算，它与已经被发现的八大行星在很多方面格格不入，由于当时的各方面因素，仍然把它定位于第九大行星，但是这一定位一直存有争议，并影响至今。2006 年 8 月国际天文学联合会决议中，将冥王星从大行星中剔除，定义其为矮行星，或称其为“海外天体”。这一决定解决了多年的纷争。

冥王星的半径为 1 160km，比地球的卫星——月球还小得多，体积不足地球的 1%，质量为 1.43×10^{22}kg，仅是地球质量的 2.4%，比月球的质量还小；密度在 1.5 ~ 1.936g/cm^3 之间。冥王星的逃逸速度约为 0.82km/s。冥王星内部有岩石核和水冰幔，表面是甲烷、氮和一氧化碳的冰壳；其表面温度变化于 47–60K。冥王星也有大气层，分为两层，外层透明，内层不透明。冥王星的轨道半长径为 39.44AU，轨道偏心率为 0.248，完全不同于八大行星，由于偏心率大，其近日点附近的一段轨道竟在海王星轨道之内。因此，它绕太阳一周过程中，总有几十年时间，比海王星还近。冥王星的轨道倾角为 17°.2，也远远大于八大行星。

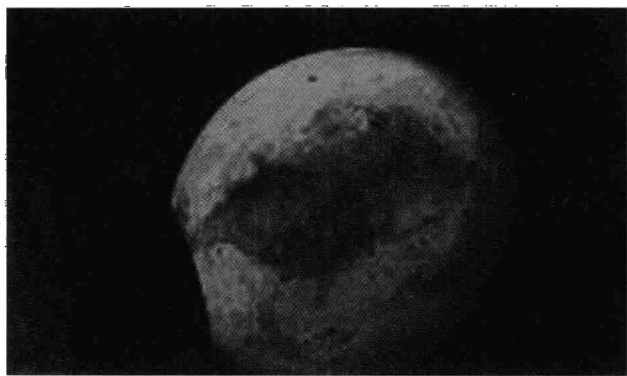



图 3–28 冥王星

10. 关于“水内行星”与“海外行星”

(1) “水内行星”

在爱因斯坦提出相对论之前，人们无法解释水星近日点每世纪有 43″的反常进动。因此，有人推测，这种反常进动是否是由水星轨道内存在行星摄动所造成的。当然如果真的存在“水内行星”，则其大距肯定非常小，应该在 10°以内，由于太靠近太阳，平常根本不可能看到。因此人们利用日全食时的绝好机会，来寻找它，有些观测者甚至宣称已经观测到水内行星，但至今没有得到证实。爱因斯坦的相对论圆满地解释了反常进动。现代天文观测资料表明，不存在所谓的水内行星。

(2) “海外行星”

“海外行星”是推测存在于海王星轨道之外的行星。在发现了海王星这个第

八大行星之后，人们自然会去找“第九大行星”，在发现冥王星之后，再去找“第十大行星”也就顺理成章。当然如果真的存在“第十大行星”，要找到它难度也是相当的大。最主要的原因是：它本身是不发可见光的，靠反射太阳光才会发亮，但是它离太阳太遥远了，能接收并反射太阳的光十分有限，这十分有限的反射光又要传送到十分遥远的地球被我们所看到，也就十分的困难。因此自冥王星发现以来的近80年中，很多天文学家和天文爱好者在孜孜不倦的勤奋探索，但至今没有令人信服的观测结果。2006年曾有人宣称发现了“第十大行星”，它到太阳的距离约97AU，位于太阳系外围的柯伊伯带（是在海王星轨道远处的一个由冰冻的星体组成的环状星带）。星体由岩石和冰组成，表面覆盖着固态甲烷。星体的轨道为椭圆形，环绕太阳周期是560年，近日点距太阳53亿千米。它的大小与冥王星相当，直径应小于2 900km。这一宣布并没有在世界天文学界引起太大的震动，普遍认为要证实它为“第十大行星”（即海外行星），还有待时日。也许这个星体是类似于冥王星的“矮行星”。

四、太阳系的卫星

太阳系的大行星多数都有卫星，因此卫星是太阳系重要的一类天体。

1. 大行星的卫星数量

大行星的卫星数量见表3-3、表3-4。

表3-4 太阳系大行星的卫星数（截止2003年）

行星名称	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	合计
卫星数	0	0	1	2	61	31	24	11	130
卫星名称	/	/	月球	火卫	木卫	土卫	天卫	海卫	/

上表给出的是天文学界公认的各大行星的卫星数量，如果将有些行星光环中组成的岩块等也算作卫星的话，则卫星的数量难以计数。此外，以前称为第九大行星的冥王星，至今已发现有3颗卫星。人们还发现有几颗小行星（如大力神星编号532、18号、6号、44号、64号及24号小行星）也有卫星。

2. 卫星分类

根据卫星的轨道特点可把卫星分为两类：一类称为规则卫星，它们的轨道具有共面性、同向性和近圆性特点，并且距离分布符合提丢斯－波得定则的卫星，如木卫一至木卫五，除土卫八、土卫九、土卫十一以外的土卫，天卫一至天卫五等；相反，轨道不符合上述规律的卫星称为不规则卫星。根据卫星绕行星公转的方向也可把卫星分为两类：一类是称为顺行卫星，指其公转方向与行星绕太阳公转方向相同；另一类是逆行卫星，它的公转方向与行星公转方向相反，如木卫八、木卫九、木卫十一、木卫十二、天卫一至天卫五。卫星中一部分质量、体积较大的

由于自引力作用呈球体形状，另外一些质量、体积较小的则呈不规则形状（图3-29）。另外还有一类我们称为同步卫星，它们的自转周期与它们绕行星公转的周期相同，如月球、木卫一至木卫四，海卫一、火卫一和火卫二。

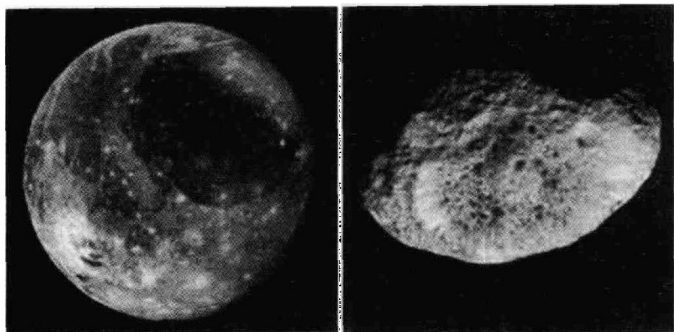



图 3-29 木卫三(左)和土卫七(右)

3. 几颗有特色的卫星

除月球外，木卫一至木卫四是最早被发现的卫星，1610 年，伽利略用自制望远镜观测木星时，首先发现了它们，因此它们被称为伽利略卫星。这一发现也极大地支持了“日心说”。木卫三(图 3-29)是太阳系中最大的卫星，直径 5 268km，比水星还大，更比我们的月球和矮行星冥王星大得多，但密度较小，很可能是冰和岩石的混合物，亮度也较大，视星等为 5 等；木卫三表面布满环形山，有很高的山脊，裂缝和沟槽。不断释放出氢原子和带电氢离子，两极还有臭氧，有自己的磁场。木卫十三是大行星卫星中最小的卫星，直径只有 10km。木卫一最大的特点是有一些活火山，有的火山以每小时近千米的速度向外喷射物质，高度达数百千米，是太阳系内观测到的火山活动最为剧烈的卫星。火山周围，发现有大量的二氧化硫的堆积物。火卫一(图 3-30)和火卫二(图 3-31)是两颗形状不规则的卫星，很像马铃薯，表面布满陨石坑，自转周期与公转周期相同。木卫二是由厚厚冰层覆盖着的岩石球体，白色的冰层上，有浅浅的纵横沟壑，表面陨石坑很少。因为有水，引起人们在它上面寻找生命的兴趣。土卫二是太阳系内表面亮度最大的卫星。天卫一至天卫五的表面特征很像地球，特别是天卫五，地貌形态丰富，既有悬崖峭壁，又有高山峡谷。土卫六是太阳系中仅次于木卫三的第二大卫星，呈橙红色，有很厚的大气层，大气中有甲烷和分子氢。据猜测，土卫六上可能生存有低级的生命。冥王星的卫星卡戎最特别，质量为冥王星的 1/10，直径为冥王星的 50%以上，距冥王星仅 1.9×10^{4}km；另外它的自转周期、公转周期与冥王星的自转周期都相同，这在太阳系中是独一无二的。

月球是我们地球唯一的天然卫星，非常有特色，它和地球构成了一个简单的天体系统——地月系(详见第二章)。

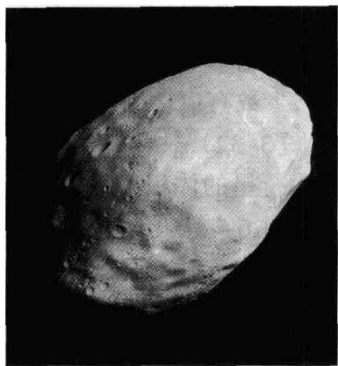



图 3-30 火卫一

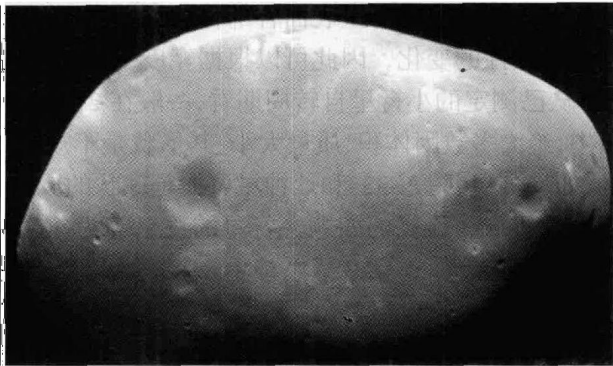



图 3-31 火卫二

第四节 太阳系的小天体

根据 2006 年 8 月国际天文学联合会决议，太阳系小天体是指除行星、矮行星之外的其他所有围绕太阳运动的不是卫星的天体。小天体主要有三类：小行星、彗星和流星体。

一、小行星

小行星的发现十分意外，按照提丢斯－波得定则，前五颗大行星都大致在定则的规定的位置范围，但是，在距太阳 2.8 个天文单位的位置却缺少大行星对应，天文学家把望远镜指向这个区域，终于于 1801 年元旦夜找到了一颗行星，被命名为谷神星，但经测算，其体积和质量都太小而被叫作小行星(图 3-32)。随后寻找大行星虽一无所获，但却发现了许许多多大大小小的小行星，已获永久编号的有一万多颗，据估计总数约有上百万颗，但总质量约为地球的万分之四。它们轨道大多数集中在火星和木星之间，构成小行星带(图 3-6)，带内分布是不均匀的，有些区域稀疏，有些区域密集。轨道半长径在 2.17～3.64AU 之间，平均值为 2.77AU，少数轨道偏离较大，甚至在水星轨道内和冥王星轨道外。还有一部分十分接近地球的轨道，这些小行星被称为近地小行星，如阿莫尔型、阿波罗型和阿坦型小行星，近地小行星有近千颗，它们有可能给地球造成潜在的威胁，因而监测它们很有必要。小行星轨道偏心率较大，平均值为 0.15。轨道倾角也较大，平均值为 9°.4。已发现的小行星绕太阳公转的方向都是自西向东。小行星的体积一般都很小，半径大于 40km 的大约只有 150 个。最大的小行星谷神星直径 770km。小行星的质量也都很小，谷神星的质量$(11.7\pm0.6)\times10^{23}$克，智神星为$(2.6\pm0.8)\times10^{23}$g，灶神星为$(2.4\pm0.2)\times10^{23}$g。由小行星的质量和体积可计算出它们的密

度比地球都小。小行星表面各部分的反照不同，如果小行星自转，就会造成其亮度有周期性的变化，因此可以根据亮度变化曲线确定其自转周期和自转轴的取向。从已测定的小行星自转周期看，一般在 2～16 小时，少数有更长的周期。小行星中，绝大多数因体积、质量太小，其形状是不规则的（图 3-32），只有极少数较大的，如谷神星（图 3-33）和灶神星可能是球状的。由于小行星的体积很小，其视亮度也就较低，最亮的四颗小行星的视星等为：4 号灶神星 6.5 等，1 号谷神星 7.4 等，2 号智神星 8.0 等，3 号婚神星 8.7 等。可见它们一般都不能由肉眼观测到。按反照率特征，小行星可分为两类：一类是反照率小，仅 0.05 左右；另一类反照率较大，在 0.15 左右；还有少数反照率很大，在 0.3 左右这说明它们的金属含量较高。

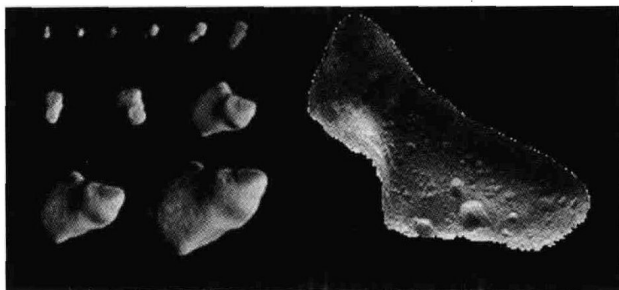



图 3-32 小行星

关于小行星的命名，一般分两步走：新发现的先给予临时命名，由公元年份和两个拉丁字母组成，从而表明它是何时发现的，如 1949MD 表示它是 1949 年 6 月下半月发现的第四颗小行星。算出轨道后，再经两次以上冲日观测，就可赋予永久编号和专有名称。永久编号由若干位阿拉伯数组成，是小行星的“身份证”编号，专有名称则五花八门，既有古希腊、罗马的神话人物，也有发现者意愿命名，小行星中用我国人、事、物命名的有数十颗，其中有古代天文学家、科学家、企业家，也有地名、单位等。如祖冲之（1888）、戴文赛（3405）、钱学森（3763）、田家炳（2886）、南京（2078）、铜陵（12418）、丽江（14656）、北京大学（7072）以及中华（1125）等（括号中数字是永久编号）。

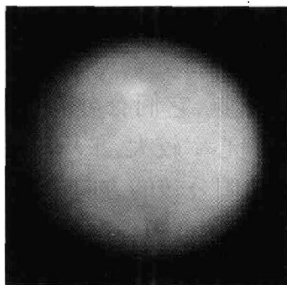



图 3-33 谷神星

二、彗　星

彗星(图 3-34)是在圆锥曲线上绕太阳运行的质量较小的天体,呈云雾状的独特的外观。如果轨道是扁长椭圆轨道(极少数是近圆轨道),彗星会定期回归,我们称为周期彗星,若轨道为抛物线或双曲线,则彗星不会回归,我们称为非周期彗星。

在科学不发达的古代和中世纪,彗星的偶然出现和它的奇特外貌,常使人们感到惊慌和恐怖,以致认为彗星的出现是不吉利的。"彗"有扫帚的意思,彗星在我国民间亦称"扫帚星"。实际上彗星的出现只是一种自然现象。彗星是冰雪、石块、尘埃等物质组成的混合物,因而有人称之为"肮脏的雪球"。彗星主要由彗头和彗尾构成,彗头又由彗核和彗发组成,彗尾又有离子尾和尘埃尾之区别。由于彗星本身不发光,只有反射太阳光才能被我们看见,因此,当彗星距太阳很远时,反射的阳光少,亮度小而不能被我们看见(即使用天文望远镜)。当它逐渐接近太阳时,有如下一些表现:彗星越来越亮,彗尾越来越长,彗尾总是出现在彗星背离太阳的一侧。造成这样一些表现特征,是由于越接近太阳,获得的太阳辐射能越多,受到太阳风"吹送"作用越强,彗核蒸发出来的气体分子和小固体质点被太阳粒子辐射和光压、推向背向太阳的一侧。彗尾最长时可达数亿千米,宽达近万千米,但密度极小,只有地面空气密度的十亿分之一。彗星的质量差别很大,大的可达 $10^3 \sim 10^4$ 亿吨,小的只有几十吨。周期彗星在每次回归过程中都要散失大量质量,若轨道要素不变,其每次回归的亮度都会大大减小。如哈雷彗星,我国史书中曾有 30 多次记录,可见当时应该很亮,1986 年那次回归(笔者有幸在望远镜中看到它),肉眼已很难见到。

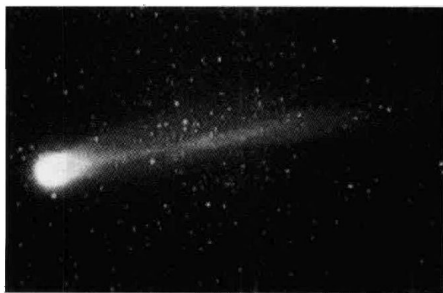



图 3-34 彗　星

彗星的命名类似于小行星,对于新发现的彗星给予临时命名,用发现年份加上表示发现次序的拉丁字母 a、b、c 等,根据观测算出轨道后,再按彗星过近日点的先后为序,在年代后加罗马数字Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等取代拉丁字母 a、b、c 等,作为永久命名。如我国紫金山天文台 1965 年发现两颗彗星,是这一年发现的第二、三颗彗

星,临时命名为 1965b 和 1965c,算出轨道后的永久命名为 1965 Ⅰ 和 1965 Ⅱ。某一年新发现的彗星可能在另一年(比如下一年)才过近日点,所以永久命名常要迟 2~3 年,以避免再发现新彗星而更动命名序号。新发现的彗星还常以独立发现者的名字命名(最多三人)。对于短周期彗星,还常在前面加上符号 P/,有的彗星还给予其他命名,如哈雷彗星、紫金山 1 号(1965 Ⅰ)等。

关于彗星的起源,至今尚无定论,因而仍然是一个谜。比较著名的假说有奥尔特原云假说:1950 年,荷兰天文学家奥尔特(J·H·Oort)根据 19 颗长周期彗星的轨道半长径在 3~10 万天文单位之间的统计结果,推测在太阳系边远区有个彗星储库——"彗星云",又称奥尔特云。内有上亿颗彗星,绕太阳公转一周要几百万年。但其中一部分由于受到附近天体如恒星的摄动而改变轨道进入太阳系,又有一部分再受大行星摄动而形成轨道不同、周期各异、形态多样的彗星,也有一部分被抛射出太阳系。1951 年,美籍荷兰天文学家柯伊伯提出在太阳系海王星轨道外不远处存在一个拥有几亿到几百亿颗彗星的彗星带——柯伊伯彗星带,同样,由于其它天体的摄动,极少数彗星进入太阳系,在接近太阳时有可能被我们看到。

自发现第一颗彗星以来,人类已发现的彗星有 1600 多颗。目前,用望远镜每年平均可发现 10 颗彗星。在已发现的彗星中被测算出轨道的有 600 多颗,其中椭圆轨道的约占 40%,接近抛物线轨道的约占 49%,双曲线轨道的约占 11%。1705 年,美国天文学家哈雷计算出已被观测过的 24 颗彗星的轨道,发现 1531 年、1607 年和 1682 年三次出现的彗星轨道相似,他认为是同一颗彗星,并认为其周期为 76 年。这颗彗星后来被命名为哈雷彗星(图 3-35),它由于是第一颗被测算出周期并按预言按时回归的彗星而十分著名。按照这样的周期推算,普查我国史书中有关彗星的记载,可以确认有过 31 次出现记录,最早是公元前 613 年。

图 3-35 哈雷彗星

1. 哈雷慧星

哈雷彗星的近日距(图 3-36)为 8 800 万千米(约合 0.59AU),远日距为 53 亿千米(合 35.31AU),轨道偏心率为 0.967。哈雷彗星的原始质量估计小于 10 万亿吨,估计它每回归一次后,质量减少约 20 亿吨。据此推测,哈雷彗星每次回归都应该比前一次亮度小些。比如 1910 年回归时,景象极其壮观,彗尾横跨半个天空,长达 2 亿千米,张角达 140°,像银河一样宽阔明亮,横扫地球而过,但没有给地球造成任何“灾难”。而 1986 年回归时,远不如 1910 年回归时的辉煌和壮观,一般只能在天文望远镜中较清晰的看到它。不过,如今的科学技术也非昔日可比,人类充分利用航天技术,先后发射 6 艘宇宙飞船,进行了前所未有的大规模观测,距彗核近距离(仅 500km)观测结果有力证实,彗核是由尘埃、沙砾和冰雪等所构成的“脏雪球”。

哈雷彗星下次回归应该在 2061 年前后。

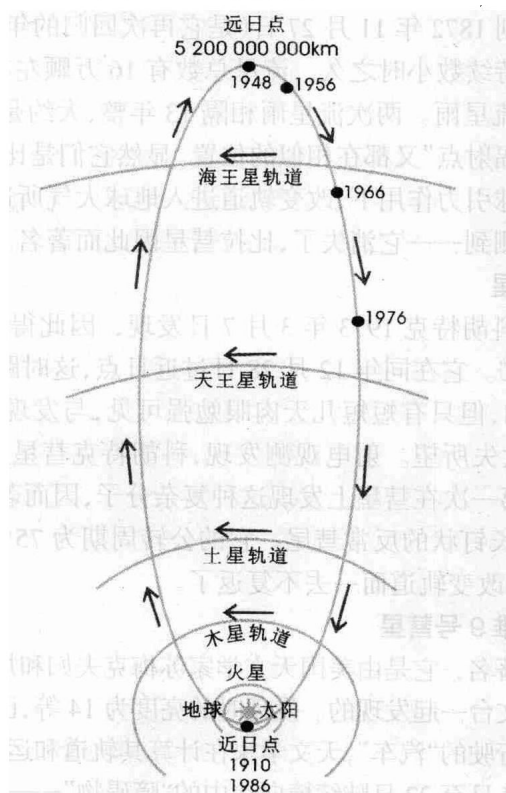



图 3-36 哈雷彗星的轨道

2. 恩克彗星

1786 年首先被发现,19 世纪初,德国天文学家恩克最早算出它的轨道,并预

言它将在 1822 年回到近日点。到时，彗星如期而至，因而被称为恩克彗星。它是继哈雷彗星后，第二个被推算出周期并按预言重新出现的彗星，恩克彗星的周期只有 3 年 106 天（约合 3.3 年），以周期短而著名，自首次被发现至今，应该回归近百次了。周期如此之短是由其轨道决定的，其轨道偏心率为 0.847，近日距为 0.34AU。恩克彗星的亮度较弱，相当于 5 等星，只是一团不亮的雾斑拖着短彗尾或无彗尾；绝对亮度没有多大变化；其轨道运动有加速现象，而且有突然变化。根据恩克彗星近日距较小，亮度较弱的特点，可以推测其体积和质量都不大，因而有人估计它的寿命不长，本世纪可能就不复存在了。

3. 比拉彗星

1772 年被测到，1826 年奥地利人比拉再次发现而得名。1846 年 1 月 13 日，比拉彗星突然分裂为两颗，并都有彗尾，它们的距离越来越大，后来都远离太阳而去。按照计算确定的 6.6 年公转周期，它应该在 1859 年和 1865 年再次回归，但却没有观测到。到 1872 年 11 月 27 日（是它再次回归的年份）夜晚，天空中出现灿烂的流星雨，持续数小时之久，流星总数有 16 万颗左右，1885 年 11 月 27 日夜晚再次出现大流星雨。两次流星雨相隔 13 年整，大约是比拉彗星周期的 2 倍，两次流星雨的“辐射点”又都在相似的位置。显然它们是比拉彗星瓦解后的两颗彗星的碎粒在地球引力作用下，改变轨道进入地球大气所造成的。此后，比拉彗星再也没有被观测到——它消失了，比拉彗星因此而著名。

4. 科胡特克彗星

捷克天文学家科胡特克 1973 年 3 月 7 日发现，因此得名，此时亮度为 16 等，距离太阳 4.75AU。它在同年 12 月 28 日过近日点，这时距太阳 2 100 万千米等，亮度有很大增加，但只有短短几天肉眼勉强可见，与发现时预期的 −10 等大相径庭，令很多人大失所望。射电观测发现，科胡特克彗星上存在着 CH_3CN 和 HCN 的射电，这是第一次在彗星上发现这种复杂分子，因而著名。天空实验室的宇航员还看到它有长钉状的反常彗尾。它的公转周期为 75 000 年，由于受其它天体的摄动，可能因改变轨道而一去不复返了。

5. 苏梅克 - 利维 9 号彗星

因撞击木星而著名，它是由美国天文学家苏梅克夫妇和加拿大业余天文学家利维在泊洛玛山天文台一起发现的。发现时的亮度为 14 等，已经分裂成 20 多块，形成一列几乎等速行驶的“汽车”，天文学家在计算其轨道和运行速度后预告，它们将于 1994 年 7 月 17 日至 22 日陆续撞向途中的“障碍物”——木星。那将是有史以来人类首次看到天体相撞的宇宙奇观。因此，人们以极大的热情关注这一千载难逢的“宇宙交通事故”。“彗木相撞”如期发生，全世界上百个天文台以及哈勃空间望远镜和伽俐略号空间探测器等都实况记录下这惊心动魄的壮观场面。这一事件不仅

轰动地球，也给人类留下诸多思索，其中之一便是：彗星是否也会撞击地球！这使得天文学家更加重视对彗星的观测和研究。

6. 威斯特彗星

是20世纪出现的一颗最漂亮的大彗星，并且周期特长（30万年）而著名。它是1975年2月25日过近日点以后达到最亮，为 -3 等，它的彗尾又宽又大，宛如一只洁白的孔雀在夜空中张开了妩媚的羽屏，令人称奇。我国东部有许多人都看到了这颗明亮的大彗星。1978年3月8日，它已一分为二，3月12日，又变成了四块。

7. 百武彗星

因首次探测到有X射线发射的彗星而著名。这颗彗星是日本天文爱好者百武裕司在1996年1月30日发现的。发现时它位于火星轨道附近，亮度很低，到了3月份，它的亮度急剧增加，一直增到1等左右，肉眼清晰可见。它的一条长长的蓝色离子尾，横跨夜空六七十度，蔚为壮观。更引人注目的是，同年3月26日至28日，美国和德国天文学家通过"罗赛特"X射线天文卫星观测，发现它有X射线发出，而且强度也是天文学家始料未及的。这一发现给天文学家增添了新的研究和探测课题。5月1日，百武彗星过近日点，经计算，其公转周期大约为200年。

8. 海尔 – 波普彗星

因在20世纪末和新世纪即将来临之际，首先观测到钠原子彗尾且较亮的大彗星而被人称为"世纪大彗星"，因而十分著名。这颗彗星是1995年7月22日由美国天文学家海尔和天文爱好者波普分别独立在人马座发现，编号为199501号。发现时亮度仅为10.5等，距太阳约10.7亿千米，距地球约9.3亿千米。1997年3月9日发生日全食时，可见到"彗日同辉"的奇特天象。1997年4月2日过近日点，距太阳1.36亿千米，最亮时达 -0.8 等。蓝色等离子彗尾和黄色的尘埃彗尾都异常明显，两者组成一个30°的交角。令人惊奇的是还发现有反向彗尾和以前从未观测到过的钠原子彗尾。海尔 – 波普彗星的轨道面与黄道面的夹角为89.43°，几乎垂直，它在轨道上的公转周期大约为3 000年，也就是说要等到公元5000年前后才能再睹其迷人风彩。

9. 池谷 – 关勉彗星

因是典型的掠日彗星——指一些近日距很小的彗星，往往掠过太阳外层大气（日冕）而著名。这类彗星至今只观测到几颗。它是1965年9月4日由日本的两位天文爱好者池谷和关勉同时独立发现的。它的突出特点是近日距很小，仅46万千米（日冕下界距日约2 000 ~ 10 000千米，其厚度约为280 ~ 350万千米），因此，它在1965年10月2日过近日点及其前后穿过温度高达数百万度但密度极为稀薄的日冕层。10月中下旬，它的亮度达到 -11 等，甚至白天也能看到，人

称“神话般的大彗星”。11 月 4 日发现它已分裂为三块。它的公转周期是 880 年，它的下一次回归应该是公元 2845 年前后。

10. 麦克诺特彗星

2006 年 8 月 7 日由澳大利亚塞丁泉巡天系统的麦克诺特发现，发现时亮度为 19 等，初步计算轨道显示，彗星在 2007 年 1 月过近日点。

三、流星体

行星际空间存在着很多绕太阳独立运行的大大小小的尘粒、固体块物质，除前面所述的小行星和彗星外，我们称之为流星体。流星体的质量一般很小，绝大多数小于 100 吨，比如产生 5 等亮度流星的流星体直径约为 0.5cm，质量极微。有些流星体成群地在相近的轨道上绕太阳公转，我们称之为流星群。有些流星体和流星群在绕太阳公转中接近地球时，由于地球的引力摄动，会改变轨道而高速闯入地球大气，与大气摩擦燃烧发光，在夜空中表现为一条或众多的光迹，这种现象就叫“流星”(图 3–37)或流星雨(图 3–38)，一般发生在距地面 100km 或更高的高空中。流星通常单个零星出现，出现的时间和方向也无规律，平均每小时可看到 10 个左右，称为偶发流星，但是偶发流星在整个夜晚出现的频数则不一样：从统计上来说下半夜出现的流星比上半夜多，而且也比较明亮，原因是下半夜流星体是与地球迎面相遇造成的，而上半夜则是流星体追上地球所造成的，前者流星体运动方向与地球运动方向相反，而后者相同。流星中特别明亮的叫火流星，火流星出现时，像条闪闪发光的巨大火龙，发出“沙沙”的响声，有时还有爆炸声。有的火流星甚至白天也能看到。火流星的出现是因为较大质量流星体进入地球大气后，来不及在高空燃尽而继续闯入稠密的低层大气，以极高的速度和大气剧烈摩擦而产生出耀眼的光亮。火流星消失后，在它穿过的路径上，会留下云雾状的长带，称为“流星余迹”；有些余迹消失得很快，有的则可存在几秒钟到几分钟，甚至长达几十分钟。有时候在天空某一区域或在某一段时间内流星的数目特别多，每小时几十个或更多，这种现象叫流星雨(图 3–38)，特别多的流星雨又称流星暴。一般认为流星雨或流星暴的出现与彗星有关，观测资料已经证实，猎户座流星雨、宝瓶座流星雨与哈雷彗星有关，英仙座流星雨与斯威夫特 – 塔特尔彗星有关，仙女座流星雨与比拉彗星有关，因而也称比拉流星雨，狮子座流星雨与坦布尔 – 塔特尔彗星有关等。在地球上看流星雨仿佛都从同一点向外辐射出来，这一点称为流星雨的辐射点(图 3–38)，事实上造成流星雨的流星群中的各个流星体在空间的运动轨道基本上是彼此平行的，由于透视的原因，我们看到的流星雨似乎有一辐射点。大多数流星雨以其视位置所在的星座或附近的恒星命名，如除了上面提到的 5 个著名流星雨，还有双子座流星雨、天龙座流星雨、天琴座流星

雨以及宝瓶座 δ 流星雨等(见附录“主要流星群”)。

图 3-37 流 星

图 3-38 流星雨及流星雨辐射点

流星体在穿越地球大气的过程中,绝大部分因摩擦生热燃烧殆尽。但也有少数较大的流星体在到达地球表面时仍然没有燃烧完, 这部分残留下来的流星体我们称之为陨星。陨星据其物质构成可分:石质的称石陨星,简称陨石(图 3-39,图 3-40),占陨星总数的 92%;铁质的称铁陨星,简称陨铁,占 6%;石、铁混合质的称石铁陨星,简称陨铁石,占 2%。前者主要由硅酸盐组成,还有少量的铁、镍金属,密度在 3.0 ~ 3.5g/cm^3 之间。陨石又分球粒陨石和非球粒陨石,球粒陨石内部一般都散布着许多球状颗粒,直径从零点几到几毫米,这是一种地球上还没有见到的特殊结构。在一些陨石中找到了水,一些陨石中含有钻石,一些碳质球粒陨石中找到了多种有机物,现在已发现 60 多种有机化合物。铁陨星除了铁镍外,还含有少量铁的硫化物、磷化物和碳化物;密度为 7.5 ~ 8.0g/cm^3。陨铁石中,硅酸盐和铁金镍金属各占一半,密度为 5.5 ~ 6.0g/cm^3。

左　　　　　　　　中　　　　　　　　右

图 3-39 铁陨星(左)　石陨星(中)　石铁陨星(右)

据观测资料估算,每年降落到地球上(含地球大气)的流星体总质量约有 20 万吨,其中绝大部分在大气中燃烧而汽化,即使将 20 万吨都算作地球增加的质量,那也是微不足道的。

陨星是天外来客,向我们传送重要的宇宙信息,是非常难得的天体样本,因此,对陨星的研究有十分重要的意义。首先通过对陨星内放射性物质相对含量的测定,可以推算其年龄,此点对太阳系演化的年代学研究显得十分重要。据测定和分析,太阳系各类陨石凝结的年龄大约是 45 至 46 亿年,很可能这就是太阳和各大行星的年龄。其次通过陨星的分析,可以研究太阳系形成初期的元素组成及温度等情况。另外,对陨星成分分析发现其中存在有氨、核酸、氨基酸等有机化合物,这为地球生命起源和地外生命的探索开拓新的前景。

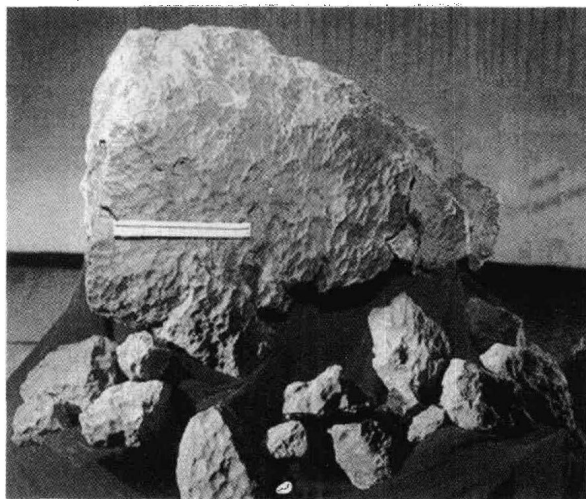



图 3-40 世界最大的石陨星

每年落到地球表面的陨星有数千块,其中绝大部分掉落在海洋、荒漠、丛林中,实际被发现的陨星很少,目击陨落过程的更是寥寥无几。出于科学需要,各国科学家在南极和非洲沙漠地区收集到大量的陨星。我国南极科考队也将收集陨星作为一项科考任务,并且收获颇丰。

陨星的鉴定可从三方面着手：一是发现样本的环境。比如在南极雪原上发现的可以直接认定；在广泛无垠的沙漠上发现的与周围环境物质完全不同的可以初步认定；二是样本的形态。陨星的形状一般不规则但多浑圆无棱无角，具有黑色的熔壳、“气印”和熔蚀坑，致密、有磁性，表面能看到金属斑点。三是实验室分析。分析陨星的比重、成分、结构等，可以最终确定是否是陨星。

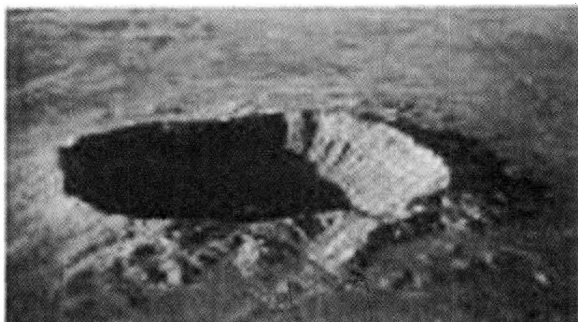



图 3-41 陨石坑

陨星落到地球表面的速度比较大，撞击地球都会产生凹坑，称为陨石坑(图3-41)。陨石坑主要有以下一些特征：陨石坑一般为圆形，完整的陨石坑一般有坑唇，它是由撞击抛射物沿坑的边缘堆积而成的。坑底结构较复杂，坑底的岩石受到巨大的陨石的轰击后，由于应力释放而产生一定程度的回弹，因此在一些大的陨石坑底部的中央有隆起的状况。在陨石坑内或周围常有陨石碎片或铁－镍球珠等残留物。地球上已发现的陨石坑超过 120 个，大部分是 2 亿年以内形成的。其中最著名的是美国亚利桑州沙漠中的巴林格尔陨石坑，它是 5 万年前由一颗直径约为 60m、重约 10 多万吨、速度达 20km/s 的铁陨星撞击所形成的。坑的直径约 1 245m，平均深度达 170m，坑的周围比附近地面高出约 40m。我国海南省白沙县有一个陨石坑，是我国发现的第一个陨石坑，直径 3.7km，坑唇形态完整，是 70 万年前一颗小行星坠落此处爆炸形成的。

思考与练习

1. 太阳的基本结构如何？有何特点？
2. 太阳黑子的运动周期及其对地球影响。
3. 根据大行星的特性，简述行星有几种分类？
4. 简述开普勒行星运动三大定律？
5. 地内行星和地外行星的视运动过程有何区别？
6. 太阳系小天体有哪些？有何特性？
7. 试说明地球与太阳系其它行星相比较有哪些独特的地方？。

第四章　恒　星

恒星是由炽热气体所组成的自身发光的球形或类似球形的天体。晴朗无月的星空中,正常视力的人在一确定的地点用肉眼大约可以看到3 000多颗星星,其中除少数几颗是太阳系的行星外,绝大部分都是恒星,因此,恒星应该是宇宙普遍存在的一类天体,是天文观测和研究的重要对象。太阳是离地球最近的恒星,其次是半人马座的比邻星,距地球4.22光年。恒星并非恒定不动,它不仅有诞生、衰老、死亡的自然演化史,而且以较快速度在宇宙空间运动,但由于离我们十分遥远,短时间内很难看到它们的视位置有变化,我国古代人认为它们是"固定不动的星体",因而称其为恒星。

第一节　恒星光谱、距离、大小和质量及其测定

恒星光谱、距离、大小和质量等是恒星的重要参数,从不同侧面反映恒星的物理性质,对它们进行测定和研究对天文学有着重要的意义。

一、恒星光谱及其测定

天体(恒星)光谱是辐射能随波长的分布,其中可见光部分通过棱镜会形成七色彩带,也有人将它称为光谱。不同光源发出的光,光谱不一样。光谱一般分三类:一类是连续光谱,它是从红光到紫光各色光连续分布的光谱,炽热的固体、液体和高压下的气体所发射的光谱都是连续光谱,无论什么成分的物质,其连续光谱的式样都是相同的,因此我们不能用连续光谱来确定恒星的化学组成。另一类是明线光谱,也叫发射光谱,它是金属蒸汽和稀薄气体发射的、由黑暗背景上的亮线组成的光谱,这些亮线叫做谱线。还有一类是暗线光谱,也叫吸收光谱,它是高温物体发出的连续光谱通过低压环境下的稀薄气体或蒸汽时,其中的某些波长的光就会被物质吸收,而在连续光谱的背景中出现一些暗线,这就形成了暗线光谱或吸收光谱。这些暗线也叫谱线。物理学上有一重要定律即基尔荷夫(Kirchhoff)定律:每一种元素都有自己独有的光谱,并且都能吸收它能够发射的谱线。这一定律成为分光学的基础,在天文学上有极为重要的意义。依据这一定

律,我们在获得恒星的光谱后,可以根据光谱中谱线的位置、相对强度或轮廓,推知恒星的化学元素组成及元素的丰度(即元素的相对含量)。例如,钠蒸汽的发射光谱是由很亮的黄色双线组成,波长是固定的 5 890 埃和 5 896 埃;氢的光谱有 7 条,氦的光谱有 12 条。而钠蒸汽的吸收光谱则是在连续光谱中有 2 条靠得很近的暗线。用光谱分析已在恒星光谱中证认出元素周期表里 90%左右的天然元素。并且已知绝大多数主序星的元素丰度基本相同,氢约占 71%,氦约占 29%,还有少量其它元素。

19 世纪末,美国哈佛大学天文台依据全天亮于 8.5 等恒星光谱中的某些特征谱线和谱带以及它们的相对强度,同时也考虑连续光谱的能量分布提出恒星光谱的分类系统即哈佛分类,该分类系统用拉丁字母表示:

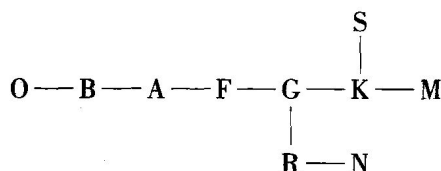
```
                        S
                        |
O — B — A — F — G — K — M
                |
                R — N
```

各型之间是逐渐过渡的,从左到右温度逐渐降低。每型又分十个次型,如 A0、A1、A2、A3、……各型特点、温度等见表 4-1 和图 4-1。

表 4-1 恒星光谱型及特点

光谱型	有效温度(K)	主要特征	颜色	例星
O	$4\times10^4\sim2.5\times10^4$	一次电离氦线(吸收或发射),强紫外连续谱	蓝色	参宿一
B	$2.5\times10^4\sim1.2\times10^4$	中性氦的吸收线	蓝白	角宿一
A	$1.15\times10^4\sim7\,700$	A0 型的氢强度极强,其他次型依次递减	白色	牛郎星
F	7 600 ~ 6 100	金属线开始显现	黄白色	老人星
G	6 000 ~ 5 000	中性金属原子和离子	黄色	太阳
K	4 900 ~ 3 700	金属线为主,弱的蓝色连续谱	红橙色	大角星
M	3 600 ~ 2 600	氧化钛的分子带明显	红色	心宿二

根据上表我们只要知道恒星的光谱型或颜色便可知恒星的温度。

分析恒星光谱除了上面所述的可以知晓恒星的组成元素和温度外,还可以获得恒星的其它一些信息:恒星的压力、恒星的磁场、恒星是否在自转及自转方向、恒星的视向速度(参考自行和恒星距离,可知其在空间的运行方向和速度)、恒星的距离以及恒星所处的演化阶段。

恒星光谱对于天文学研究如此重要,如何获得恒星光谱引起我们的关注。目前天文学上已形成一套较为完善的理论和方法来获得和分析恒星光谱。在物理学上,一般用摄谱仪(图 4-2)来获得辐射源(光源)的光谱,摄谱仪由准直系统、色散系统和成像系统三部分组成。准直系统装有透镜,作用是使光源发出的光变

成平行光；色散系统装有三棱镜，作用是使从准直系统出来的平行光由于折射率不同而产生色散；成像系统装有照相机，光谱在这里被记录（拍摄）下来。

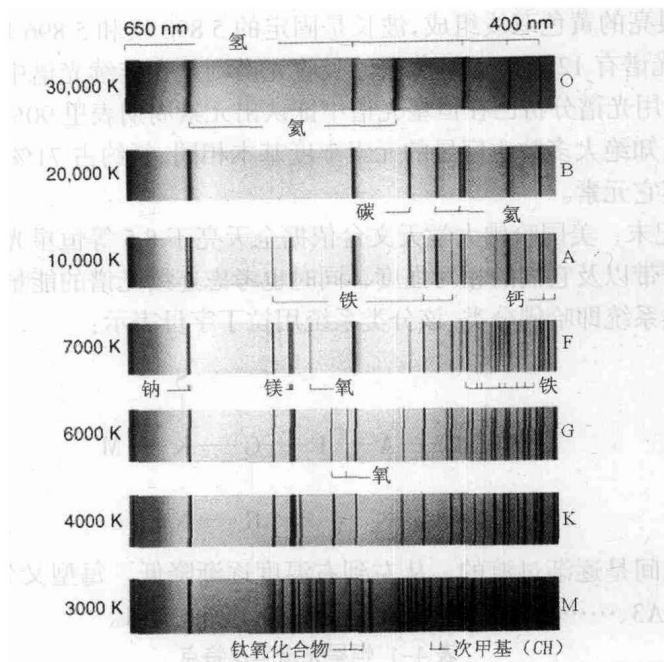



图 4–1 恒星的光谱型及若干元素的谱线

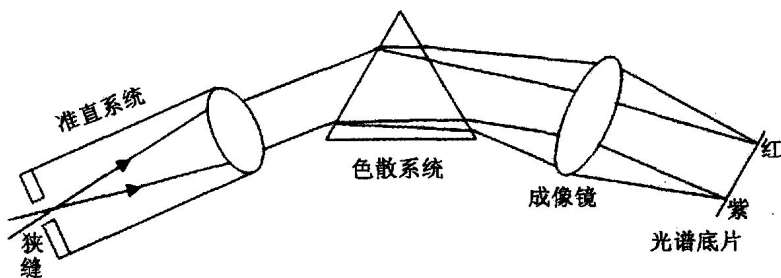



图 4–2 摄谱仪

要拍摄恒星的光谱则需对摄谱仪进行改造。因为恒星光都较暗弱，一般摄谱仪无法获得恒星的光，因此我们只要在摄谱仪的准直系统前加装聚光系统——天文望远镜即可。这样改装后的仪器称为天体摄谱仪（图 4–3）。

根据已测定的大量恒星的光谱和光度，20 世纪初，丹麦天文学家赫茨普龙（Ejnar Hertzsprung，1873–1967）和美国天文学家罗素（Henry Norris Russell，1877–1957）各自独立研究它们之间的关系，并绘制出赫 – 罗图（H–R 图，又称光谱 – 光度图，见图 4–4）。该图纵坐标为光度（或绝对星等），横坐标为光谱型（或

表面温度),实则是点聚图,即将已测定的大量恒星的光谱和光度在坐标中点出即可获得该图。由图可看出,恒星大致集中分布在四个区域,不同区域恒星的年龄是不同的,主星序的恒星年龄较轻,其它的年龄较老。当我们测定了恒星的光谱和光度后,就可以找到这颗恒星在赫-罗图中的位置,也就可以知道这颗恒星的大致年龄。

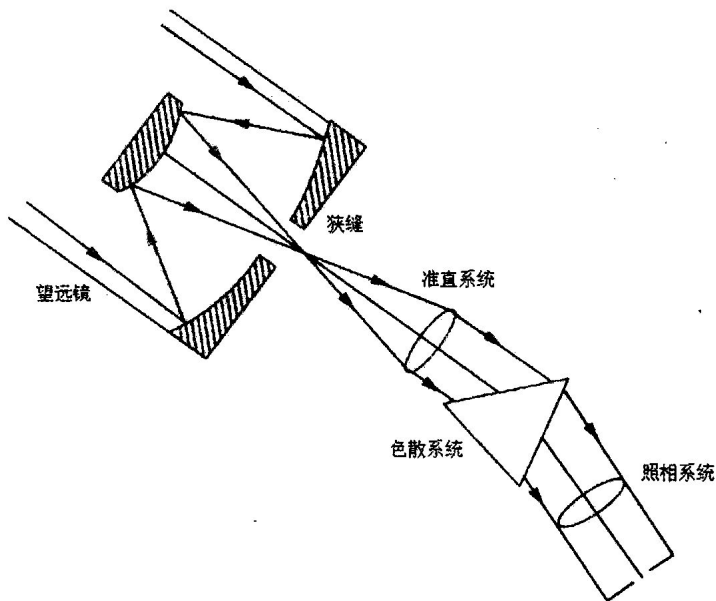



图 4-3 天体摄谱仪

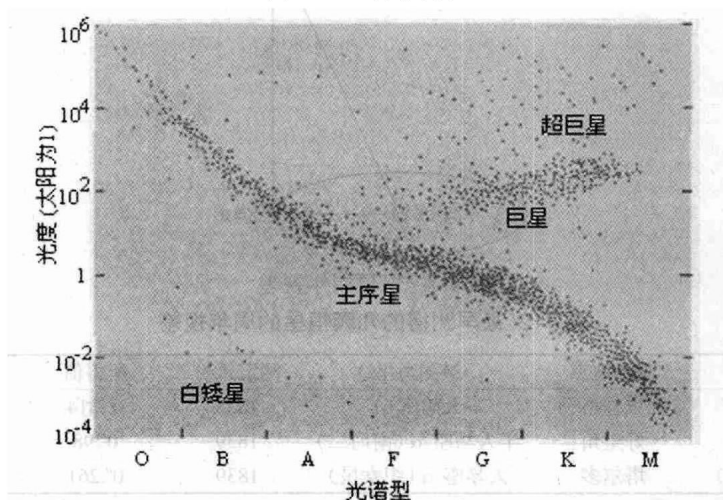



图 4-4 光谱-光度图

二、恒星距离的测定

夜晚所看到的恒星，我们感觉它们的距离似乎是一样的远，其实不然，经测定它们的距离千差万别。

太阳是离我们最近的恒星，关于它到地球距离的测定不同于其它恒星，已在第二章中作了介绍。

除太阳以外的恒星由于远近等的不同，而采用不同的测定方法。

1. 三角视差法(用于测定较近恒星的距离)

三角视差法是测量学的重要概念和方法，用于测定不可到达目标的距离。恒星是不可到达的目标，因而人们很自然想到用这种方法来测定恒星的距离，测量学中的三角视差法的道理很简单，如要测定 AC 的距离(C 是不可到达的目标，图 4–5)，我们可以选定可以到达的 B 点，AB 叫做基线，直接测出 AB 的长度，再用经纬仪测出∠BAC 和∠ABC 的度数，用三角函数即可求出 AC 的长度。

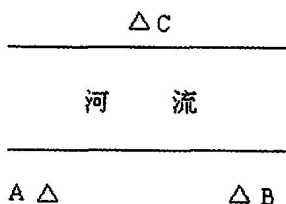



图 4–5 三角视差法

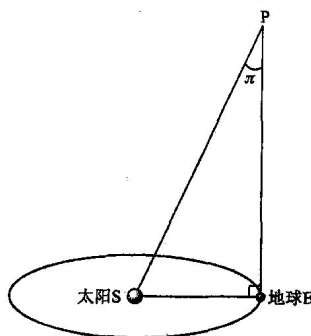



图 4–6 恒星周年视差

表 4–2 最早测得的几颗恒星的周年视差

观测者	观测地点	被测恒星	测定年份	所得值	现代值
白塞耳(德)	加里林格勒	天鹅座 61	1838	0″.314	0″.30
亨德森(英)	好望角	半人马座 α(南门二)	1839	0″.98	0″.76
斯特鲁维(俄)	塔尔多	天琴座 α(织女星)	1839	0″.261	0″.124

用三角视差法测定恒星的距离所用的基线是地球公转轨道的半径，即一个

天文单位。我们知道,地球是绕太阳公转的,因此,地球在轨道上的位置变化会导致我们在观测同一恒星时,其视位置发生变化,这种现象叫做恒星的视差位移,地球绕太阳运行一周,恒星视位置变化的轨迹也会在天球上画一个椭圆(或线段),我们称之为视差椭圆。地球公转半径对恒星的张角即为恒星的视差;当恒星与地球的连线恰好垂直于地球公转轨道半径(SE=a)时,π 值达最大,这时的 π 叫做恒星的周年视差(图 4-6)。按照地心说的理论,这个角是不存在的,当哥白尼提出日心说后,反对者则以观测不到恒星视差作为有力的反对论据。由于恒星十分遥远,这个角太小了,在当时的科学技术水平下无法观测到,经过 300 多年的努力,当然有赖于观测仪器和观测技术的进步,才由德国天文学家白塞耳等人测得几颗较近恒星的周年视差(表 4-2)。

测出恒星的周年视差,我们很容易求出恒星的距离:$\sin\pi = a / D$,日地距离是常数,因此恒星周年视差的大小决定于恒星的距离 D,恒星的距离 D(单位为秒差距)与恒星周年视差 π(单位为角秒)互为倒数,恒星愈远,恒星周年视差愈小,反之则愈大。恒星都很遥远,因此恒星周年视差都很小。

2. 分光视差法(用于测定较远但能拍摄到光谱的恒星的距离)

更远的恒星很难精确测出其周年视差的有效值,只能寻求其它方法。20 世纪后采用的分光视差法是通过恒星光谱分析来测定恒星的距离。该方法的理论基础是:恒星光谱的峰值波长与其表面温度和其绝对星等有很好的对应关系,因此,我们只要用分光技术测得恒星光谱的峰值波长,便可推知其表面温度和其绝对星等,再实测其视星等,用公式 $M=m+5-5\lg d$ 很容易求知恒星的距离,用分光视差法时应考虑星际物质对绝对星等 M 和视星等 m 的影响。

3. 造父周光关系测距法(用于测定更远且亮度有周期性变化的恒星的距离)

造父是中国古代的星官名称(见附录"中国古代星空划分"),造父变星是高光度周期性脉动变星(星体膨胀时亮度增大,星体缩小时亮度减小)。仙王座 δ 星的中文名称叫造父一,是一颗典型的脉动变星,因此类似于仙王座 δ 星都叫做造父变星。造父变星的光变周期多数在 1~50 天,可见光波段的光变幅为 0.1~2 个星等,光谱也有很大的变化。造父变星有一个很重要的特点,即光变周期与光度之间有密切的关系,即造父变星的光变周期愈长,其光度也愈大,称为周光关系。这种关系是天文学家在研究众多造父变星后发现的,且被研究的造父变星都在同一星系内,可以认为它们同地球有大致相同的距离,所以,周期和视星等的关系就反映了周期和绝对星等的关系。图 4-7 给出了光变周期与光度之间的关系,横坐标是光变周期的对数 $\lg(P/d)$,纵坐标是绝对星等 M。周光关系确定后,人们很自然想到可以用它来测定银河系内一些恒星集团的距离和邻近的河外星系的距离。显然,对于造父变星,我们只要测出它的光变周期 P——以天

为单位(这一点天文学上很容易做到),便可利用周光关系推算绝对星等 M,再实测出视星等,即可由 $M=m+5-5\lg d$ 式求出距离 d。因此,造父变星在天文学界有"量天尺"之称。用此法测距,零点的准确很重要。

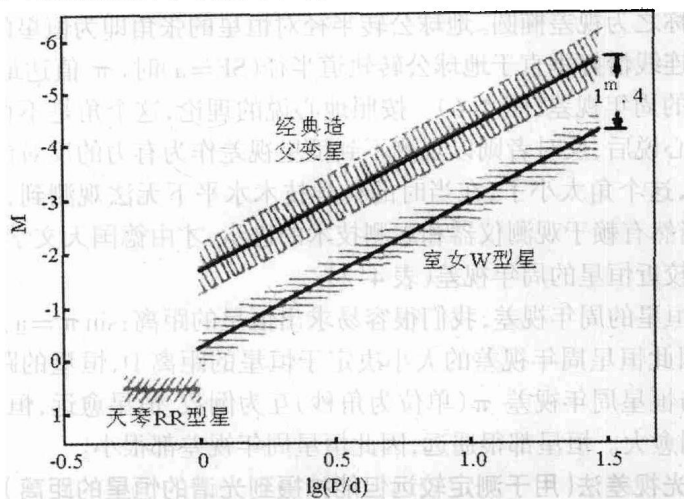



图 4-7 周光关系图

4. 谱线红移测距法(用于测定更加遥远的天体或天体系统的距离)

谱线红移是指谱线偏离正常频率位置而向红端移动的现象。20 世纪 20 年代,人们在研究河外星系时发现,绝大多数星系的光谱都有程度不同的红移,1929 年美国天文学家哈勃(Edwin Powell Hubble,1889 ~ 1953)发现河外星系的视向速度(亦即红移量 Z 的大小)与其距离 d 成正比,即星系越远红移量越大。这种关系叫做哈勃定律,可用下式表示:

$$Z=Hd/c$$

式中,Z 为红移量;d 为距离;H 为哈勃常数,目前采用 H=50~80km/s·Mpc。在实际工作中,首先拍摄星系的光谱,比照实验室的标准光谱,计算其红移量,代入上式计算就能获得该星系的距离。

三、恒星大小及其测定

恒星的大小是恒星的重要参数之一,测定并研究其大小有重要意义。

太阳也是一颗恒星,关于它的大小前面已作介绍。除太阳以外的恒星都十分遥远,测定它们的大小并不象测定太阳大小那么容易,尽管如此,天文学家还是找到一些测定不同恒星大小的办法。

1. 月掩星法

这种方法只能测定有一定角直径且能够被月球遮掩的恒星,也就是说,这类

恒星应位于白道两侧不超过 15′～16′的范围。具体方法是:选定新月和上弦月之间的一个夜晚(月光较弱),确定你所要测定的恒星,在月轮东缘即将与恒星西缘相外切时,开启光电设备,记录月掩星全过程并记录恒星被掩的时间长度(t),即光电流开始减弱至达到最小值时的时间间隔，还要测定月球运动方向与恒星与月球相外切时切点的切线的夹角 θ(图 4-8),月球的运行角速度 v 平均为 0″.5/s。我们就可以用 $\beta=vt\sin\theta$ 式直接求出恒星的角直径，再依据被测恒星的距离(D)求出其大小。

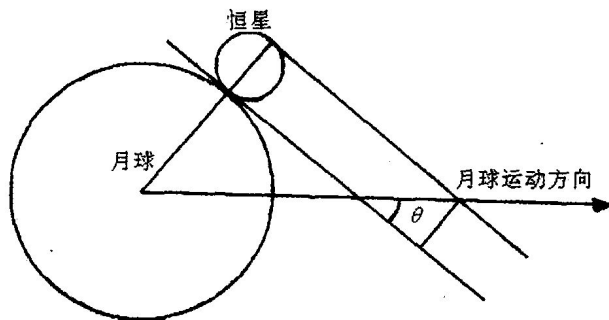



图 4-8 月掩星法测恒星的大小

2. 干涉法

离白道较远的恒星，不可能被月球遮掩，因而不能用月掩星法测恒星的大小,但天文学上用另一种方法即干涉法来测恒星的大小,其方法是:在光阑上开两个大小相等且对称位于望远镜物镜光学中心两边的小孔，用此光阑盖住望远镜物镜便构成一架简单的相位相关干涉仪。目前多采用两架相隔一定距离且有联系的望远镜组成的干涉仪,叫做强度干涉仪。它们统称恒星干涉仪,是利用相位相关干涉或强度干涉方法测量恒星角直径和双星角距离的一种装置。用这种装置可测若干恒星的角直径。如澳大利亚的强度干涉仪是由两架可变距离在 0～188m 之间,口径同为 6.5m 的光学望远镜组成,每个望远镜连接一个相同的光电光度计,两架望远镜在同时观测同一恒星时,接收到的星光信号强度是相关的,改变两望远镜的距离,可得到恒星不同的干涉图像,由此可计算该恒星的角直径,测定该恒星的距离,便可知该恒星的线半径。

3. 光度法

月掩星法和干涉法只能测定有一定角直径的恒星，但绝大多数恒星因距离我们太遥远而角直径太小,无法用上述两种方法来测定它们的大小,对于这些恒星,天文学上采用的是另外一些间接方法如光度法。我们知道,物理学上有一个重要的定律即斯蒂芬(Stefan)－玻耳兹曼(Boltzman)定律,据实验和研究得出:黑体表面单位面积上单位时间内的放射能力(E)与它表面的绝对温度(T)的 4 次

方成正比,即:

$$E=\sigma T^4$$

式中,$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}w/(m^2 \cdot k^4)$,称为斯蒂芬－玻耳兹曼常数。这一定律亦可近似用于恒星的辐射。

我们假定某恒星的半径为R,则该恒星的表面积为$4\pi R^2$。由此可知该恒星单位时间内的总辐射能力即恒星的光度(L)为:

$$L=4\pi R^2 \sigma T^4$$

由恒星的光度L和恒星的有效温度T可求出恒星的半径。T可根据该恒星的光谱分析得出,L可由下式求出:$\lg L=-0.4(M-M_{\odot})$,式中$M_{\odot}=4^m.83$,是太阳的绝对星等,M是恒星的绝对星等,由公式$M=m+5-5\lg d$求知(该式中视星等m可直接测定,恒星距离d也可通过测定获得,见恒星距离的测定)。

讲恒星的半径通常以太阳半径($R_{\odot}$)做单位,恒星的半径相差很大,小的只有太阳半径的几百分之一,甚至只有十几千米,如中子星;大的可以是太阳半径的数百倍甚至数千倍,如超巨星。在恒星世界中,绝大多数恒星的半径都在几十个太阳半径至几十分之一个太阳半径的范围内。

四、恒星质量及其测定

质量是恒星的一个重要物理量,它不仅从一个侧面彰显恒星的物理特性,它还决定恒星的寿命长短和演化进程,因此,恒星质量的测定是恒星研究的一个重要课题。

太阳也是一颗恒星,关于它的质量测定前面已作介绍。除太阳以外的恒星质量都很大,我们通常以太阳质量($M_{\odot}$)作单位来表示恒星的质量。

恒星都十分遥远,要直接测定它们的质量也就十分困难。目前,只有物理双星(两颗互有引力且相互绕转的恒星)的质量能被直接测定。测定物理双星质量的依据是牛顿修正后的开普勒第三定律即行星绕太阳公转半长径(α)的立方与其周期(T)的平方及两者质量之和的乘积成正比,表达式为$\alpha^3/T^2(m+M)=G/4\pi^2$,这一定律也适用于物理双星系统,若$\alpha$以天文单位作为单位,T以恒星年为单位,m、M以太阳质量为单位,则上式可简略为$m+M=\alpha^3/T^2$。这样我们通过观测得到双星的绕转周期和轨道半长径就能算出双星的质量和,再用光谱分析测出它们相对于共同质心的距离之比则可知两恒星的质量比:$\alpha/\alpha_1=m/M$,进而求出每一个恒星的质量。

但是宇宙中物理双星相对还是较少,更多的还是孤立存在的单个恒星,对于单个恒星质量的测定尚无直接的方法,目前多采用质光关系法来间接测定。100多年来通过对大量主序星的观测和分析,发现绝大多数主序星的质量和光度之

间有很好的正相关关系，即恒星的质量越大，其光度越强，这就是所谓的质光关系。并总结绘制出图 4-9，图中纵轴表示光度（太阳光度为 1），对应着绝对星等，横轴表示质量（太阳质量为 1），图中结果反映恒星质量与光度存在简单的线性关系。这样，我们只要测出恒星的光度，即可在图中查出该恒星的质量。

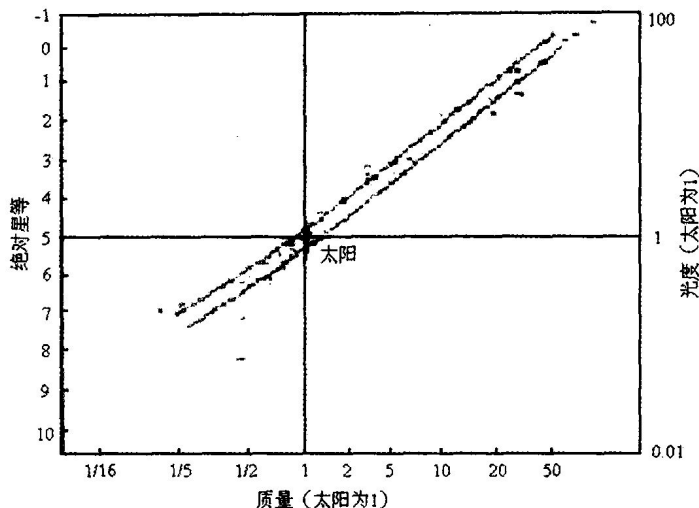



图 4-9 质光关系图

另外，质光关系的表达式如下：

$$\lg(L/L_\odot)=3.8\lg(m/m_\odot)+0.08$$

式中 L、$L_\odot$、m 和 $m_\odot$分别是恒星光度、太阳光度、恒星质量和太阳质量。$L_\odot$、$m_\odot$和 L 测定后便可算出恒星的质量 m。

恒星的质量差别相对小些，绝大部分恒星的质量是太阳质量的几十分之一到上百倍。但它们的体积却相差悬殊，可达数千亿倍以上，可以推论，恒星的密度差异也十分惊人。如中子星密度可达每立方厘米 1 亿吨，而红超巨星的平均密度仅为水的百万分之一甚至亿分之一。

第二节　恒星的运动

人类对恒星运动的认识有一个过程，起初认为恒星是不动的，后来才认识到它与一切物质一样都是运动着的。既然是运动的，人类就试图测定它的运动速度。我国在战国时代就造出测量恒星位置、从而确定恒星运动的仪器；1717 年前后，西方国家的天文学家也进行了大量观测，并发现一些恒星的位置有明显的变化，说明恒星是运动的，到了近代人们对恒星运动的观测更科学、更精确，认识更

完善、更深刻。

一、关于多普勒效应

1842 年奥地利物理学家和数学家多普勒（Christian Johann Doppler）研究指出：当光源（或声源）相对观测者移动时，观测者接受到的波长会发生变化，光源（或声源）接近时波长变短（即频率变高），远离时波长变长（即频率变低）。恒星会发出辐射（包括可见光），当它远离我们时，谱线波长增长，谱线就向红光方向移动，称为红移；如果恒星朝向我们运动，谱线波长变短，谱线就向紫光方向移动，称为紫移。并且恒星离开或接近我们的速度越大，谱线的多普勒位移也就越大，即“红移量”或“紫移量”越大。由此可见，多普勒效应在研究恒星的运动中有重要作用。

二、恒星的视向速度和切向速度

恒星的空间运动速度可分解为视向速度和切向速度（图 4–10）。前者是指沿着观测者视线方向恒星在单位时间内移动的距离，单位是 km/s，目前已测过数万颗恒星的视向速度，大多数在 ± 20km/s（“＋”号表示恒星远离我们，“－”号表示恒星接近我们）之间，极少数超出 ± 100 km/s；后者是指恒星在垂直视线方向上单位时间内移动的距离，单位是 km/s。如巴纳德星（在蛇夫座）的空间速度为 140km/s，切向速度为 90km/s，视向速度为 –108km/s。视线方向的运动及速度，可以通过测定恒星光谱是红移还是紫移以及红移量或紫移量的大小，来确定恒星是远离我们还是接近我们以及远离或接近我们的速度。切向速度可由恒星的距离和自行求得。由此可见，恒星并非恒定不动。

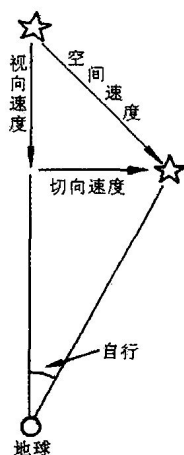



图 4–10 恒星的空间运动速度与自行

三、恒星的自行

恒星的自行是指单位时间内(一年)恒星在垂直视线方向上走过的距离对观测者所张的角度,单位是角秒/年。恒星自行普遍很小,一般都小于0″.1/年,只有四百多颗恒星的自行等于或大于1″/年。其中,巴纳德星自行最大,为10″.31/年。

显然自行大小与两个因素有关,一是恒星的切向速度,二是恒星的距离。切向速度相同,距离愈远,自行愈小,反之愈大;恒星的距离相同,切向速度愈大,自行愈大,反之愈小。巴纳德星之所以有较大的自行,是它离我们较近。它距我们只有5.9ly,是除太阳和南门二丙星(即半人马座比邻星)外离我们最近的恒星。同时也有较大的切向速度。

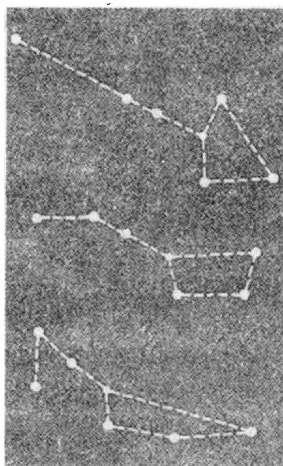
由上可见,恒星自行太小,人眼已无法察觉,短期内恒星间的相对位置看上去是"固定"的。由于各恒星的空间运动方向速度各不相同,距离亦千差万别,因此,恒星的自行是不同步的,即不仅方向不同,速度也不同。经过长时期自行值的累积,恒星间的相对位置会有明显的变化(图4-11)。

上:十万年前　中:现在　下:十万年后

图4-11 北斗七星的自行造成的形状变化

四、恒星的自转

恒星绕自身的轴转动称为恒星的自转。欲知恒星是否自转,只要测定恒星的光谱即可,因为恒星自转会使光谱吸收线加宽,因此,可以根据谱线的宽度测定恒星是否自转及自转速度。对有一定视面的恒星,也可以通过拍摄视面两侧的光谱来确定恒星是否自转及自转的方向和速度。长期天文观测和研究证实,恒星的自转运动是普遍存在的,但各类恒星的自转速度却各不相同,如主序星的早型星

(B型、A型)自转速度较大,晚型星(C型、K型、M型)自转速度较小。

通过对太阳黑子的长期观测和对太阳光谱的研究,发现太阳也有自转,其自转方向为自西向东,自转轴与黄轴成7°15′的倾角;不仅如此,其赤道到两极间各纬度的自转速度是不同的,称为较差自转。在赤道区,自转速度平均为2km/s,自转一周大约26天;在两极区,自转速度较小,自转一周大约37天。其它恒星也有类似于太阳的较差自转。

第三节　恒星的内部结构与能源机制

恒星离我们都很遥远,我们只能观测到它的外部,而不能直接观测到它的内部。但是恒星的外部形态和特征与其内部结构有着密切的联系,后者是因,前者是果。因此,我们可以观测恒星并获得其质量、化学成分及组成恒星各元素的丰度、演化阶段等间接推知恒星的内部结构及能源机制。另外,太阳是离我们最近的恒星,对太阳的研究就比对其它恒星的研究方便;太阳也是较为典型的恒星,在恒星世界有较好的代表性,因此,我们可以通过对太阳这个恒星"样本"的研究,而推知类似于太阳的恒星的内部结构及能源机制。

一、恒星的内部结构

恒星是相当稳定的炽热气体球结构,处于流体静力学平衡状态。根据恒星内部结构理论,恒星内部的能量传输主要由辐射或对流两种机制或两者共同作用来实现。但是,不同恒星其内部结构有所不同,在主星序阶段的部分恒星的内部结构,主要由质量来决定:质量是太阳质量0.08~0.27倍的恒星,对流层一直延伸至恒星的中心;质量是太阳质量0.64倍的恒星,对流层厚度可达恒星半径的三分之一;质量是太阳质量0.8~1.7倍的恒星,对流层较大;质量是太阳质量1.7倍以上的恒星,对流层影响可以忽略,完全是辐射层,而中心部分有对流核心;质量是太阳质量2倍以上的大质量恒星,由于中心温度高,温度梯度大,导致对流。

二、恒星的能源机制

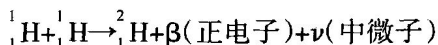
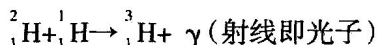
恒星(如太阳)长时间发出强烈光辉,也就损失大量的能量,能量来源何处,产能机制是什么,人类经历了一个漫长的探索过程。直到20世纪初,爱因斯坦创立相对论后,太阳以及恒星的能源机制才有了正确结论。

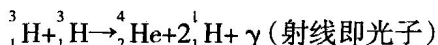
我们知道,恒星内部具有高压和高密度特点,并由此而产生高温。在此"三高"条件下,物质的原子结构遭到破坏,原子核因"三高"而克服原子核之间的电斥力并聚合成一种新的较重的原子核,同时释放出大量能量,这就是热核反应。

氢原子的原子核由 1 个质子组成,2 个氢原子聚合成氘核,它由 1 个质子、1 个中子组成:

$$_{1}^{1}H+_{1}^{1}H\rightarrow_{1}^{2}H+\beta(\text{正电子})+\nu(\text{中微子})$$

氘核($_{1}^{2}H$)与 1 氢原子核聚合成氚($_{1}^{3}H$),它由 1 个质子、2 个中子组成:

$$_{1}^{2}H+_{1}^{1}H\rightarrow_{1}^{3}H+\gamma(\text{射线即光子})$$

2 个氚($_{1}^{3}H$)核聚合成氦核(He),它由 2 个质子、2 个中子组成:

$$_{1}^{3}H+_{1}^{3}H\rightarrow_{2}^{4}He+2_{1}^{1}H+\gamma(\text{射线即光子})$$

在这一系列反应中,质量受到损失。1 个氢核($_{1}^{1}H$)的质量为 1.00812 原子质量单位,4 个氢核($_{1}^{1}H$)的质量为 4.03248 原子质量单位,氦核的质量为 4.00386 原子质量单位,也就是说,4 个氢核聚变为 1 个氦核后,其质量损失了 4.03248–4.00386=0.02862 原子质量单位。根据爱因斯坦质 – 能关系式:

$$E=mc^2$$

可计算由 4 个氢核聚变为 1 个氦核后,因质量损失 0.02862 原子质量单位而产生的能量为:$E=2.8\times10^{12}J$。由此可见,热核反应的效率很高,足以维持恒星(以及太阳)长时间大量的能量损失。尽管如此,恒星的质量毕竟在损失,经过更长时间,恒星应该有所表现。据有关学者研究,100 万年前,太阳的亮度是现在的 4 倍,表面温度比现在高 500℃。

第四节　恒星的多样性

恒星化学组成和质量差异都不大,但着眼点不同,也可把恒星划分各种类型。依据恒星的聚合状态有:单星、双星、聚星和星团等;依据恒星光度或亮度的变化有变星,它又含多种类型;依据恒星的演化阶段和结果有:主序星、红巨星、超巨星和白矮星等;依据恒星的特殊性质(如密度、引力等)有:普通恒星、中子星、脉冲星和黑洞等。

一、单星、双星、聚星和星团

此类恒星一般都是传统意义上的恒星,是根据它们之间的相互关系或聚合状态来划分的。

1. 单　星

单星是指与其它恒星没有任何关系而孤立存在的恒星,也称孤星。太阳就是一颗单星,距太阳最近的恒星是半人马座 α 星(中文名南门二,亦称比邻星),相

距 4.2 光年，如此遥远的距离使得两者之间既无引力作用，也无其它任何联系。而在太阳有效引力范围内，没有其它任何恒星存在。

2. 双　星

双星分光学双星和物理双星两类。前者只是它们的视位置在天球上很靠近，实际上没有如引力、绕转等任何物理联系，它们在视线方向上的距离可能十分遥远，也有称其为假双星；后者则是真正的双星，是指两颗互有引力作用而沿着轨道互相绕转的恒星。组成双星的两颗星称为双星的子星。此类双星是恒星世界的普遍现象，约占已知恒星的三分之一。如天狼星、南门二、五车二、南河三、角宿一、心宿二、北河二、北斗一和参宿三等都是双星。

物理双星中按照观测方式又可为以下几种：一是目视双星，指通过望远镜，人眼可直接分辨开子星的双星；二是干涉双星，指用干涉测量法测知的双星；三是掩食双星，指由掩星观测分析而略知的双星；四是分光双星，指由谱线位移的规律性而判知的双星；五是光谱双星，指由观测连续光谱能量分布而判知的双星；六是食双星，指两子星相互绕转而彼此掩食造成亮度规则变化的双星，又称食变星；七是椭球双星，指由两颗椭球状子星组成，其合成亮度随位相按一定规律变化而被发现的双星。

椭球双星和食双星可合称测光双星，很多人又把分光双星和测光双星合称密近双星。

按照观测波段或包含的特殊对象可分为：射电双星、X 射线双星、爆发双星和脉冲双星等。

光学双星没有什么研究意义，但物理双星的研究却有十分重要的意义。首先，双星是测量恒星质量和其它基本参数的重要对象，一些单星的质量估值，要用双星质量对比检验；其次，双星是研究引力的“标本”，通过对双星引力的研究，为研究相对论和引力波提供宝贵资料；再次，对双星的研究有助于人们认识恒星之间各种相互作用的条件、恒星内部的密度分布、大气结构、爆发等；此外，还有助于恒星起源和演化等问题的解决。

3. 聚　星

由两颗以上互有物理联系的恒星聚合在一起构成的多重恒星系统叫聚星。聚星内恒星数一般不超过 10 个，有时也按星数称三合星、四合星等等。聚星可分两类，一类是普通聚星，其成员星两两组成双星，双星与另外成员之间的距离至少是双星的两子星间距的 3 倍，甚至可达十几倍，大熊座 ξ（中名开阳）是一个著名聚星；一类是四边形聚星，其成员之间的距离差不多。

4. 星　团

由 10 个以上恒星组成的、被各成员星的引力束缚在一起的恒星群称为星团。

星团可分为球状星团和疏散星团两类。前者因其形状是球对称或接近于球对称而得名,比较著名的有武仙座球状星团、M22(NGC6656)等。球状星团内的恒星十分密集,成员星有数万到数百万个。目前在银河系内已发现有130个球状星团,大部分分布在银晕内,据估计,银河系内约有500个球状星团。球状星团是银河系内很老的天体,一般年龄约为100亿年。疏散星团因成员星彼此角距离较大、显得较分散而得名,已知的疏散星团约有一半位于银道面附近,因而也称银河星团,比较著名的有毕星团、昴星团、M67(NGC2862)等。疏散星团内的恒星比较稀疏,成员星一般只有十几到几百个。疏散星团多是由年轻恒星组成(详见第五章第一节)。

5. 星　协

光谱型类似、物理性质相近、比星团稀疏得多且互相之间有物理联系的恒星群称为星协,如O星协、B星协等。

二、变星、新星和超新星

变星是指由于内在的物理原因或外界的几何原因而发生亮度变化的恒星。有些恒星虽然亮度没有变化,但其他物理性质有变化的或光学波段以外的电磁辐射有变化的也归入变星之列。到1982年为止发现和命名的有两万多颗变星。分光技术提供了变星物理性质的重要信息,不仅为发现变星,也为研究变化的原因提供了条件。但在已知变星中,做过光谱观测的仅占25%左右。

变星种类很多,涉及恒星演化的各个阶段,变星的研究必然促进恒星理论的发展;食变星为确定恒星的质量、大小等物理量提供了难得的机会;造父变星的周光关系为宇宙尺度提供了基本校准,新星、超新星的极大亮度可作为粗略的距离指针;变星分属于中介星族Ⅰ、旋臂星族、盘星族、中介星族Ⅱ和晕星族(见星族)五种不同空间结构次系,对银河系结构和动力学的研究也有重要意义。

1. 物理变星

物理变星是指由本身物理原因(例如,由于辐射出来的总能量发生了变化)而引起亮度变化的恒星,这类恒星是不稳定恒星。在已发现的两万多颗变星中,大部分都是物理变星。亮度的变化是这类变星的重要特征,这可能是由于存在周期性脉动,不规则性的迸发,或者是发生巨大的毁灭性的爆炸等原因引起的。因此,物理变星又可分为许多类型,大多数为脉动变星和爆发变星。由于这类变星对科学研究具有特别重要的意义,而且研究它们困难很大,因此,格外引起科学工作者们的重视。

2. 食变星

有不少恒星亮度会随时间变化,它们被称为变星,古代人把变星称为“客星”。变星光变的原因之一是双星的两颗子星相互掩食,这称为食变星(即食双星)。

3. 脉动变星

脉动变星是变星本身不断膨胀、收缩使光度等发生有规律变化的恒星。脉动变星约占变星总数的三分之一；银河系中这类变星约为200万颗。

脉动变星有很多类型，最典型的一类是造父变星，其代表是仙王星座 δ 星（中名造父一）。这颗变星的光变周期是5.4天，最亮时亮度为3.6等，最暗时亮度为4.3等。

4. 爆发性变星

新星。新星是亮度在短时间内（几小时至几天）突然剧增，然后缓慢减弱的一类变星，星等增加的幅度多数在9等到14等之间。由于新星在爆发之前一般都很暗，甚至用大望远镜也看不到，一旦爆发后，有的用肉眼就能看到，因此在历史上被称为“"新星"”。实际上，新星不是新产生的恒星。现在一般认为，新星产生在双星系统中。这个双星系统中的一颗子星是体积很小、密度很大的矮星（可以认为是白矮星），另一颗则是巨星，两颗子星相距很近，巨星的物质受到白矮星的吸引，向白矮星流去。这些物质的主要成分是氢。落进白矮星的氢使得白矮星“死灰复燃”，在其外层发生核反应，从而使白矮星外层爆发，成为新星。

新星爆发以后，所产生的气壳被抛出。气壳不断膨胀，半径增大，密度减小，最后消散在恒星际空间中。随着气壳的膨胀和消散，新星的亮度也就缓慢减弱了下去。

超新星。超新星是爆发规模比新星更大的变星，亮度的增幅为新星的数百至数千倍，抛出的气壳速度可超过10 000km/s。超新星是恒星所能经历的规模最大的灾难性爆发。

超新星爆发的形式有两种。一种是质量与太阳差不多的恒星，是双星系统的成员，并且是一颗白矮星。这类爆发与新星的差别是核反应发生在核心，整个星体炸毁，变成气体扩散到恒星际空间。

还有一种超新星，原来的质量比太阳大很多倍，不一定是双星系统成员。这类大质量恒星在核反应的最后阶段会发生灾难性的爆发，大部分物质成气壳抛出，但中心附近的物质留下来，变成一颗中子星。

三、主序星、红巨星、白矮星、中子星和黑洞

1. 主序星

恒星在赫罗图中沿左上方到右下方的沿对角线的狭窄带区内，形成一个明显序列，这个序列叫主星序（图4-12）。位于主星序中的恒星叫主序星，我们观测到的恒星大约90%都是主序星。主序星的亮度、大小和温度之间存在稳定关系。从左上方到右下方，质量渐小，温度渐低，光度渐弱。主序星的化学元素组成大致

相同，能量也都来源于核内氢聚变为氦的热核反应。主序星是恒星的青壮年时期，由于质量不同，恒星在主星序阶段停留的时间不同，晚期的演化方向也不同。

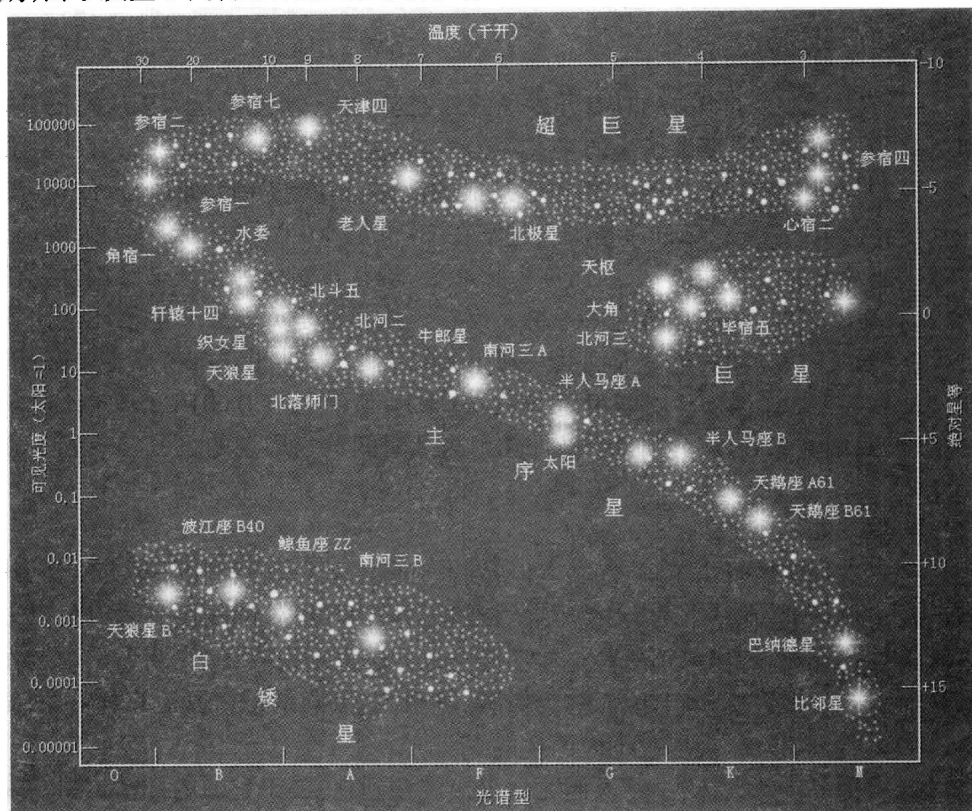



图 4-12 赫罗图

2. 红巨星

赫罗图上位于主星序右侧的那些温度低、体积大、光度大的恒星叫巨星，其中光谱型为 K(亦有称 F)或更晚的一般称为红巨星，赫罗图上位于红巨星上方光度更大的是超巨星。红巨星是恒星的暮年期。其内部结构为：核心是铁，从里向外依次各层是硅、硫；氧、氖、钠；碳、氖；氦、氮；氢和氦。由其内部结构可以看出，氢的含量已不多。

3. 白矮星

一般认为，不少恒星在红巨星阶段要失去外层物质，然后成为白矮星。白矮星在赫罗图中位于左下角，其特点是体积小，半径通常小于 10^9cm；密度高，在 10^5g/cm^3 至 10^9g/cm^3 之间；光谱型为 A 型，光度低，但表面温度高，在 5 000K 至 50 000K 之间。第一颗白矮星发现于 19 世纪中叶，1862 年 1 月 31 日克拉克父子用自制的 47cm 口径望远镜证实了德国天文学家贝塞尔 18 年前预言的天

狼主星(A)旁10″.07处有一颗约8等小星,这是一颗白矮星。到目前,已发现1 000多颗白矮星,但资料完整的只有500颗左右。据估计,银河系中至少有100亿颗白矮星。

4. 中子星和脉冲星

中子星是由中子组成的具有强磁场的致密星。中子星质量是太阳质量的0.1到2倍,体积很小,典型中子星的半径约为10km,由此可见,其密度巨大,外层密度约为10^{11}到10^{14}g/cm^3,外层内由中子组成的流体,密度约10^{14}到10^{15}g/cm^3,其内部密度高达10^{16}g/cm^3。脉冲星是天文学家在20世纪60年代发现的新型天体,它有规律地发出射电脉冲讯号,因而称为脉冲星。现在普遍认为它是早已预言存在的、具有强磁场的、快速自转的中子星。第一个脉冲星是英国天文学家休伊什和贝尔在1967年发现的,至今人们共发现1 000多颗。脉冲星观测特点主要有:周期性地发射脉冲辐射,且周期很短,最长为4.3s,最短只有0.0016s;脉冲辐射多呈单峰、双峰或多峰(5个)形状;脉冲辐射持续时间约为周期的百分之一到十分之几等。

5. 黑 洞

黑洞是广义相对论所预言的一种特别致密的暗天体。黑洞的最大特点是其引力场极其巨大,有一个称为"视界"的封闭边界,边界以外的物质和辐射可以进入其内,边界以内的任何物质甚至包括光子也无法逃出视界,使我们无法通过光的发射或反射来观察到它,因而称为黑洞。据猜测,黑洞是死亡恒星的剩余物,是特殊的大质量超巨星坍塌收缩时产生的。

黑洞是很特殊天体,由于人们无法直接观察到它,关于它的内部结构科学家只能提出各种猜想。答案之一就是:黑洞具有弯曲的空间。众所周知,光是沿直线传播的。但根据广义相对论,空间会在引力场作用下弯曲。此时,光的传播已经不是直线,而是曲线。这样,即使是被黑洞挡着的恒星,它发出的光有一部分会落入黑洞中,另一部分光线在通过弯曲的空间时绕过黑洞而到达地球。所以,我们可以观察到黑洞背后的星空,就像黑洞不存在一样。

按照黑洞定义,它不能发出光,我们如何能探测到它呢?黑洞和其它天体一样,也会将它的引力作用到它周围的天体上,因此,我们可以通过受其影响的周围天体来间接了解黑洞。当然,对孤立的黑洞,我们现在还缺少探测的办法。但如果黑洞与另一恒星组成双星系统,我们可以对恒星的运动状态进行研究,从而间接获知与其构成双星的黑洞的一般情况。天文学家观测了许多系统,在这些系统中,两颗恒星由于相互之间的引力吸引而互相围绕着运动。他们还看到了,其中只有一颗可见的恒星绕着另一颗看不见的伴星运动的系统。人们当然不能立即得出结论说,这伴星即为黑洞——它可能仅仅是一颗太暗以至于看不见的恒星

而已。

但是物质被黑洞吸积而向黑洞下落时会发出强 X 射线等,据此,我们可以进一步确定可能是黑洞。然后,测定这颗看不见的伴星的质量,若大于 3 个太阳质量,则是黑洞的可能性很大。目前,天鹅座 X-1、大麦哲伦云 X-3 和 A0620-00 很可能是黑洞的候选者。实际上,黑洞的数量可能很多,在宇宙的漫长历史中,很多恒星应该已经烧尽了它们的核燃料并坍缩了。黑洞的数目甚至比可见恒星的数目要多。在银河系中,大约总共有 1 千亿颗可见恒星。这样巨大数量的黑洞的额外引力就能解释为何银河系具有如此的转动速率,单是可见恒星的质量是不足够的。有证据表明,在银河系的中心有大得多的黑洞,其质量大约是太阳的 10 万倍。星系中的恒星若十分靠近这个黑洞时,作用在它的近端和远端上的引力之差或潮汐力会将其撕开,它们的遗骸以及其他恒星所抛出的气体将落到黑洞上去。气体将以螺旋形轨道向里运动并被加热,它可以用来说明星系中心观测到的非常紧致的射电和红外线源;热到一定程度会发出 X 射线。

按组成来划分,黑洞可以分为两大类:一是暗能量黑洞,二是物理黑洞。

暗能量黑洞主要由高速旋转的巨大的暗能量组成,它内部没有巨大的质量。巨大的暗能量以接近光速的速度旋转,其内部产生巨大的负压以吞噬物体,从而形成黑洞。暗能量黑洞是星系形成的基础,也是星团、星系团形成的基础。暗能量黑洞的体积很大,可以有太阳系那般大。物理黑洞由一颗或多颗天体坍缩形成,具有巨大的质量。当一个物理黑洞的质量等于或大于一个星系的质量时,我们称之为奇点黑洞。它的体积比起暗能量黑洞来说要小得多,它甚至可以缩小到一个奇点。

按大小来划分,黑洞可以分为三大类:一是巨黑洞,二是恒星级黑洞,三是微型黑洞。

总结起来说,白矮星、中子星和黑洞,就是晚年恒星的三种变化结果。

第五节 恒星的形成和演化

宇宙万物都有一个诞生、成长、衰老、死亡的演变过程,恒星也不例外。弥漫的星际云在引力作用下逐渐形成原恒星,当原恒星中心温度升高到能持续不断地发生热核反应以后,恒星进入一个相对稳定的时期,成为恒星演化史中的主序星阶段。一旦恒星中心处的核燃料耗尽,恒星将会出现不稳定,乃至坍缩、崩溃、爆炸,演化为白矮星、中子星或者黑洞。概括地说,恒星的一生大体上是这样度过的:星际物质→星云→星胚→原恒星→年轻恒星→中年恒星→老年恒星→衰老和死亡。总的来说,恒星在引力作用下“诞生”,也在引力作用下“死亡”。

相对于恒星的一生,人类的生命实无异于昙花一现。要以有涯逐无涯,人类唯有研究大量的恒星,再尝试找出恒星的演化过程,赫罗图便是最重要的研究工具。前已叙及,赫罗图把大量恒星的绝对星等和表面温度(或光谱型)的关系以图的方式显示出来。由赫罗图推导,天文学家才得知原来恒星一生绝大部分的时间,都在主星序阶段度过。

一、恒星的形成阶段

根据弥漫说的理论,恒星形成可分为两个阶段,开始时先由极其稀薄的星际物质凝聚成星云、星胚并进一步收缩成原恒星,然后原恒星再发展成为恒星。或者把从星际物质到原恒星的过程分为引力干扰阶段、引力塌缩阶段、快收缩阶段,把从原恒星到恒星的过程称为慢收缩阶段。

1. 引力干扰阶段

宇宙中星罗棋布着由气体及尘埃等细小粒子所组成的星际物质,这些星际物质密度很低,成分主要是氢。星际物质可以极度庞大和拥有极大质量,直径可达 1 千光年,质量相当于 10 个至 1 千个太阳质量不等。

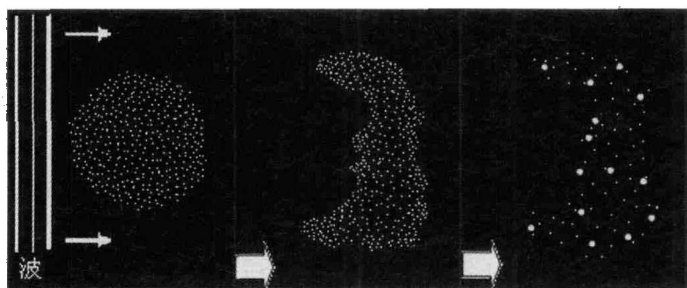



图 4–13 引力干扰造成星际物质塌缩

在不受干扰的情况下,这些星际物质可以千载不变。但是,在偶然的引力干扰以后,它们会塌缩成为密度更大的星云(图 4–13)。这些干扰可以来自星系碰撞、星系所产生的密度波、超新星爆发的激波,甚至是在附近诞生的恒星。

2. 引力塌缩阶段

星云发生塌缩的尺度与密度的平方根成反比。密度越大,各自塌缩的小团块尺度越小。当母体大星云的密度变大时,它就会碎裂成为许多块尺度较小的小星云。小星云密度增大后又会分裂成更小的下一代小星云,这一过程可能会延续几代,直到每个小星云的质量在 0.05 ~ 120$M_{\odot}$之间时,小星云就不再分裂,反而朝各自中心聚拢。这些小星云称为星胚或者星卵。

3. 快收缩阶段

收缩继续进行,刚开始时星云的温度和密度都很低。由于引力聚集作用,物

质开始向中心区降落，密度不再均匀，而是越近中心越大。塌缩过程中，星云的体积不断减少而温度不断升高，气体压力也不断增大。当中心区温度升高达2 000K，温度产生的气体压力逐渐能与引力抗衡，星云塌缩速度大为减缓，成为一颗相对稳定的原恒星（图 4–14）。

图 4–14　原恒星的吸积盘和喷流

原恒星的理论模型显示它们会有吸积盘和喷流，这些喷流不会长久存在，只维持约 10 万年左右，假若气体和尘埃把新生恒星完全覆盖，我们便看不到中心的恒星，而只能看到喷流在两边所造成的云团。

4. 慢收缩阶段

由于原恒星的核心尚未发生核聚变，所以仍不能称为真正的恒星。原恒星并不是完全停止塌缩，在重力作用下，它继续向中心缓慢塌缩，因此温度逐渐升高，最后温度足以令中心产生核聚变，这时原恒星便成为主序星。

不同质量的原恒星到达主星序所需要的时间不一样。质量越大，演化速度越快。大质量恒星只需要几万年就到达主星序，而小质量恒星则需要 3 000 万年。不同质量的原恒星到达主星序的位置也不一样（图 4–15）。相等于十至二十个太阳质量的大质量星云，会变为 O 或 B 型星，在赫罗图的左上侧。较小质量恒星会演化为 G、K 或 M 型恒星，位于赫罗图的右下侧。

如果一颗原恒星的质量只是比行星大少许，它的中心便不能产生热聚变，成为一颗昏暗而难以被发现的褐矮星（brown dwarf）。褐矮星因此也被称作是“失败的恒星”，褐矮星的质量最高只能达到太阳的 7%（或者是木星质量的 70 倍），还不足以启动和维持氢核聚变而成为恒星。如果褐矮星的质量超过 13 个木星质量就可以燃烧氘，但是氘燃烧所释放的能量和氢比起来微乎其微，而且对于质量最大的褐矮星来说氘燃烧的时间也不会超过 1 亿年。褐矮星一生中所释放的能量绝大部分是其形成和收缩时所释放的引力能，同时褐矮星也终将会变冷而老去。

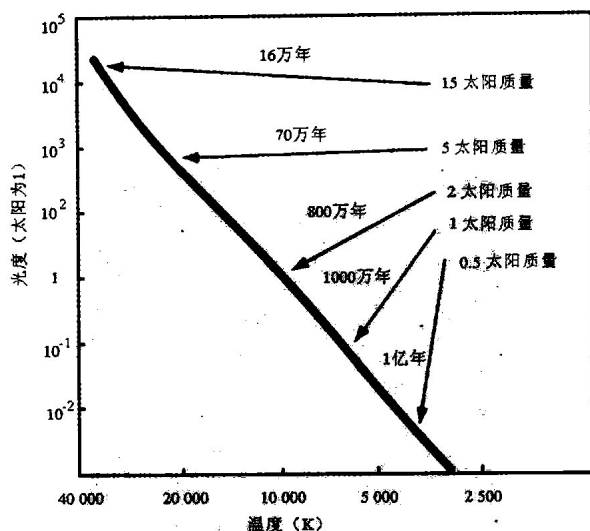



图 4–15 不同质量原恒星的演化进程

如果原恒星质量足够大(下限约为 0.05 个太阳质量,要注意的是,不同的理论模型会给出不同的下限),原恒星会不断变热,直至核心部分达到足够的高温和高压,令氢原子核克服质子间的电排斥力,产生核聚变,成为一颗真正的恒星。恒星所产生的光和热,会推开四周的气体和尘埃,吸积盘会继续存在,最后塌缩成围绕这颗恒星运行的行星。

如果原恒星质量大于 120 个太阳质量，其外层物质会发生胀大 – 缩小的振动,振幅不断加强,直到把多余的质量抛射出去。

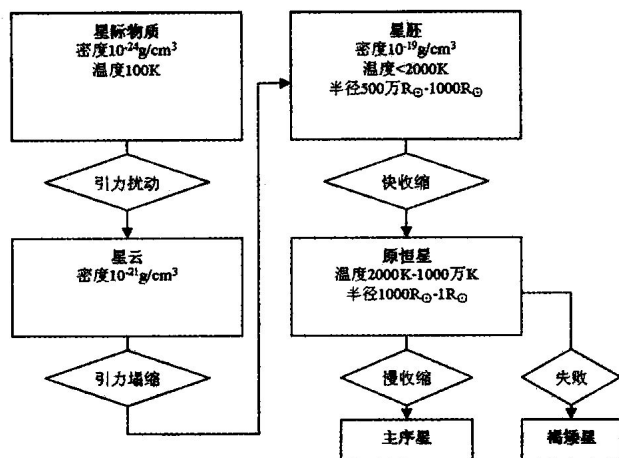



图 4–16 恒星早期演化的过程

恒星早期演化的过程如图 4–16。

二、恒星的主星序阶段

在原恒星阶段，星体的能量主要来自星际云引力塌缩时所释放的势能，星体进入主序星阶段，能量主要来自氢－氦热核反应。

若星体质量小于太阳质量的1.1倍，星体中心的温度将会少于1 500万开，核聚变主要以p–p链（质子－质子链）进行，将4颗氢原子核结合为1颗氦原子核，恒星会有辐射核心和一个对流外壳，就像我们的太阳。

如果星体质量更大，核聚变便会主要以碳氮氧循环（简称碳循环）的方式进行，这循环所造成的结果和质子－质子链没有分别，都是把4颗氢原子核结合为一颗氦原子核，碳的作用犹如催化剂。但因碳原子核带的电荷是氢原子核的6倍，碳氮氧循环需要只有大质量星体能提供的较高温度和压力才能维持。

碳循环的反应比较快，可以产生更多能量，而只有对流核心才能将这些多的能量有效地传递出去。在这些星体较外层的气体仍然很热和比较透明，所以辐射传播是一个有效的传递方法，结果是这些恒星会有一个对流核心和辐射外壳（图4–17）。

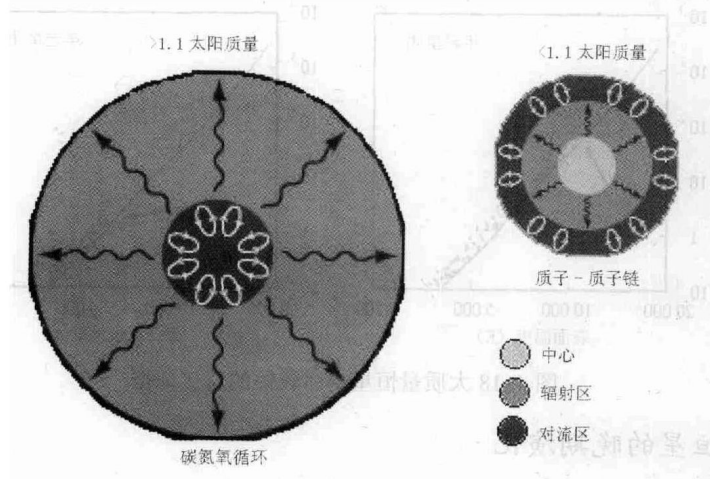



图4–17 不同质量恒星的结构

对太阳而言，目前质子－质子反应约占内部热核反应的96%，碳循环约占4%。由于恒星里氢极为丰富，而且氢聚变为氦的核反应相对进行得比较平缓，恒星在主星序上可以停留很长时间。事实上，主星序阶段是恒星一生中最长的一个阶段。但质量不同的恒星在主星序停留的时间不同，由于恒星质量越大，核心越热、密度越高，它们燃烧氢气的速度就越高，所以生命反而较短。太阳在主星序可以停留100亿年（从现在算起至少50亿年内太阳还是稳定的）；$15M_{\odot}$只能停留1 000万年，$0.2M_{\odot}$则停留1万亿年（表4–3）。

表 4–2 不同质量恒星到达主星序所需时间及其在主星序停留时间

质量($M_{\odot}$)	到达主星序所需时间(年)	在主星序停留时间(年)
30	3 万	100 万
10	30 万	3 000 万
4	100 万	3 亿
2	800 万	10 亿
1	1 000 万	100 亿
0.5	1 亿	1 000 亿
0.2	10 亿	10 000 亿

大质量恒星寿命较短的直接证据可以在星团中找到。星团内的成员星可以认为是同时诞生的，所以年龄理应差不多，那么它们最主要的分别便只剩下质量。换句话说,星团内寿命短的恒星应该已经死去,当我们把星团内的恒星以赫罗图的形式绘画出来时，我们发现位于图中左上角的大质量恒星果然已经步入死亡阶段,离开了主序星的行列,而在主序转折点上的则为即将死亡的恒星(图4–18)。

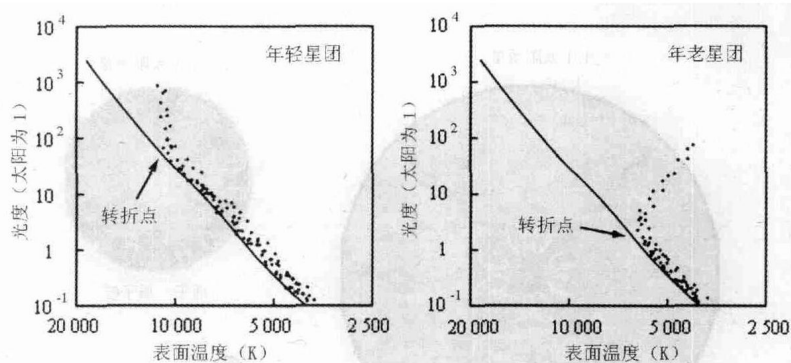



图 4–18 大质量恒星寿命较短的直接证据

三、恒星的晚期演化

经过相对漫长的主星序阶段,恒星将走向绚丽多彩的晚年。质量仍然是恒星最为重要的属性,不同质量的恒星,其度过晚年的方式大相径庭。

1. 低质量恒星

低质量恒星的演化终点没有直接观察到。宇宙的年龄被认为是一百多亿年,不足以使得这些恒星耗尽核心的氢。当前的理论都是基于计算机模型。

一颗小于太阳质量 0.4 倍的恒星,它的一生是非常平静的。它会稳定地把氢转化为氦,当核心部分的氢燃烧殆尽,恒星开始塌缩,但由于质量太小,没有能力使核心的氦燃烧起来,恒星在引力的作用下收缩得越来越厉害,氦原子和氦原子

之间的距离愈来愈近，当接近到某程度时，两个原子的电子会互相排斥，这种力称为电子简并气体压力。电子简并气体压力使质量小于 $0.4M_{\odot}$的恒星不再塌缩，但这时又不能产生核聚变，因此引力与电子简并气体压力处于平衡状态并一直维持下去，它便成为一颗白矮星。

一颗典型的白矮星比地球略小，但质量却和太阳差不多，密度是岩石的 30 万倍。当白矮星把所有能量辐射完毕，它便会成为黑矮星。但这个过程所需时间比宇宙现在的年龄更长，所以我们相信宇宙中仍没有黑矮星的存在。

2. 中等质量恒星

和太阳质量相仿的恒星在核心的氢燃烧尽之后，只剩下炉渣氦。失去了抵抗引力的核反应能量之后，恒星的外壳开始引力塌缩，核心的温度和压力升高，将核心外围的物质推开，造成核心收缩、外壳膨胀的局面。紧邻核心的氢外壳会被加热而开始有热核反应，核心的氦在温度达到了 1 亿开时就开始进行氦聚变，重新通过核聚变产生能量来抵抗引力。这双层燃烧所产生的能量使恒星大气愈发地膨胀起来。由于总表面面积的增加，恒星会变得极为光亮，称为巨星。因为膨胀令表面温度下降，结果星光变红，所以大部分的巨星叫做红巨星。红巨星的体积很大，它的半径一般比太阳大 100 倍，参宿七的半径约为太阳的 900 倍，比火星绕日轨道半径大得多。当我们的太阳演化为一颗红巨星的时候，它会膨胀到地球现在的位置，而把地球吞噬掉。

氦聚变成碳的核反应所产生能量，暂时缓解了恒星的死亡过程。对于太阳大小的恒星，此过程大约持续 10 亿年。当红巨星核心中的氦燃烧完以后，剩下炉渣碳和氧，核心在引力作用下急剧收缩。由于质量不够大，产生的引力不能使得核心的温度升高到碳和氧燃烧的程度。此时只有邻近核心的氦和更外层的氢在燃烧。在核心的氦用完后，残留下来的是一个外层包着氦的碳核，没有发生核聚变，星核开始塌缩，但稍塌缩后，星核外层的氦便可以发生核聚变，核聚变所得的能使星体的外壳膨胀，膨胀的结果使氦层的温度降低，之后氦的核聚变停止，星核又开始塌缩，塌缩使氦层的温度再次升高，再次发生核聚变，使星体的外壳膨胀，氦层温度降低……周而复始，不断循环，星体会不断脉动，因此所有红巨星都是变星。脉动愈来愈快，愈来愈猛烈，最后在一次剧烈膨胀之后，星体的外壳脱离了星核，形成行星状星云。残留下的核心成为小而致密的白矮星。

3. 大质量恒星

如果一颗恒星的质量在 3 ~ $9M_{\odot}$之间，在核心部分的氢燃烧完后，进入平稳的氦燃烧阶段。当中心氦燃烧完后，剩下的碳氧炉渣将继续收缩。由于质量较大，引力产生的温度和密度高到足以引发碳燃烧，使核心区温度急剧升高，核聚变反

应以惊人的速度进行。来不及以核心区膨胀的方式使温度下降,碳就已经全部燃烧殆尽了。这种使碳燃烧的热核反应迅速进行的过程称为"碳闪",它在短时间内释放出来的巨大能量,也许足以导致整个恒星的爆炸。爆炸以后,所有构成恒星的物质全部抛散到星际空间,什么也不留下。这就是超新星爆发的第一种类型,称为I型超新星。

如果恒星质量大于 $9M_\odot$,由于质量巨大,碳燃烧得以平稳进行,不致发生"碳闪"。核心的碳在燃烧的同时,外层的氢和氦也在燃烧着。当核心部分的碳燃烧殆尽时,温度上升到10亿开,氧也开始燃烧,氧燃烧的炉渣是硅、磷和硫。如果温度高到20亿开,这些炉渣又变成了新的燃料,直到生成铁为止。铁是恒星内部热核反应的终点站,那是因为铁在所有元素中具有最大的核结合能(图4-19)。核结合能是指将若干个核子结合成原子核放出的能量或将原子核的核子全部分散开来所需的能量。氢转化为氦会产生能量,但要把铁结合成更重的元素时,反而要吸收能量。

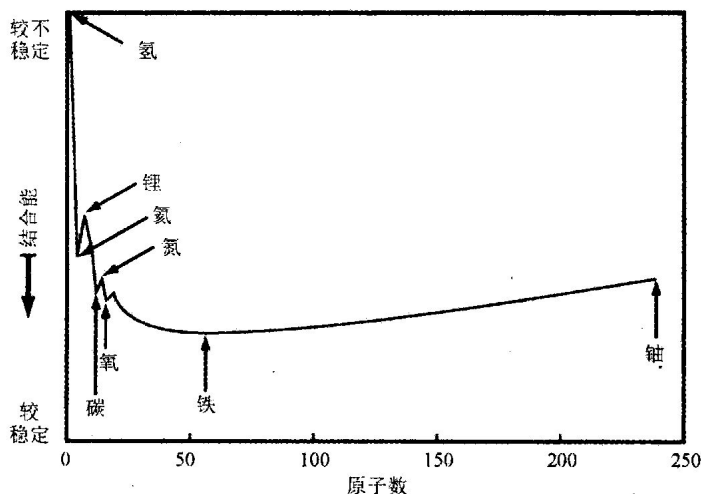



图4-19 铁具有最大的核结合能

这时的恒星由一个已经停止热核反应的等离子态铁质核心和仍在分层燃烧的多层外壳组成,体积膨胀为红超巨星。食双星仙王座VV中的红超巨星半径约为太阳半径的1 600倍,比木星绕日轨道半径还大。肉眼可见的红超巨星有心宿二(天蝎座 α)和参宿四(猎户座 α)。红超巨星的结构好像一只"洋葱头",包含着许多由不同化学元素组成的正在燃烧着的同心层(图4-20)。重元素燃烧的时间短于轻元素。对于一个质量为 $25M_\odot$的恒星,氢燃烧持续的时间是700万年,氦燃烧的时间是50万年,碳燃烧是600年,氧燃烧是1个月,硅燃烧只有1天。

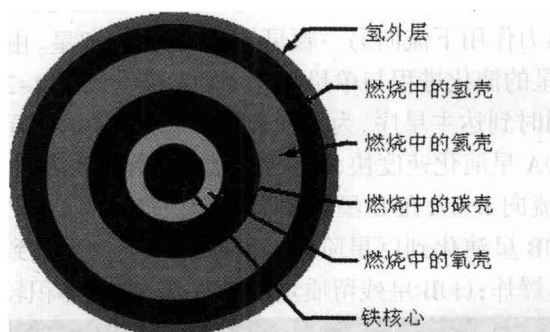



图 4-20 红超巨星的分层结构

当核心温度超过 40 亿开,光子以很高的能量击碎铁原子核,经过一系列反应后产生中子和中微子,中子在恒星核心富集,中微子逃逸出去。这些反应不仅不产生能量,反而消耗很多能量,中微子逃逸又带走了大量能量。能量丧失意味着压力减小,巨大的引力使得核心以 10 000km/s 的速度塌缩,这种"暴缩"将中心区物质压缩到原子核互相挨在一起的程度。原子核的天然密度会成为巨大的阻力,防止核心进一步收缩,这时核心会猛烈反弹。如果外层热核反应都因燃烧耗尽而停止,压力消失,引力就像泄闸洪水一样,使外层物质以超过 40 000km/s 的速度向中心区塌陷。以极高速塌缩的大量物质会和反弹中的核心碰撞,产生强烈的冲击波,把恒星外壳炸毁,这便是 II 型超新星。爆炸使大部分外层物质变为向外膨胀扩散的气体和尘埃星云,核心部分留下一颗高度致密的天体。如果这颗致密天体的质量在 1.44 $M_\odot$至 3 $M_\odot$之间,便成为中子星。如果超过 3 $M_\odot$,则成为黑洞(图 4-21)。

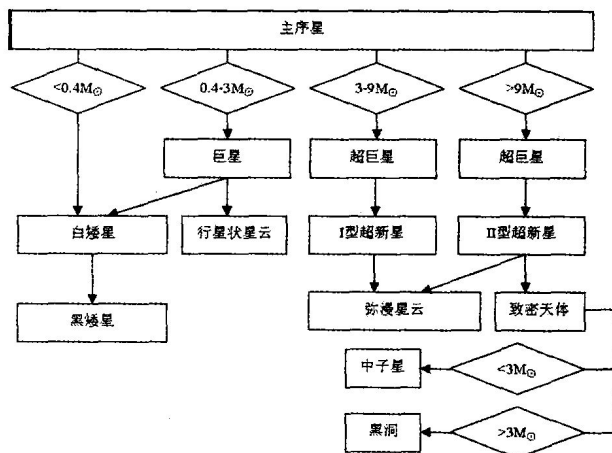



图 4-21 恒星晚期演化的过程

银河系中有大量恒星是成对存在的。如果双星彼此靠得很近，以至于一颗星的物质会在引力作用下流向另一颗星，则称为密近双星。由于两子星之间的相互作用，密近双星的演化进程与单星相比更加复杂。以图 4–22 为例。(a)一对质量不等的双星同时到达主星序，为方便表述，将大质量的子星叫作 A 星，小质量的叫作 B 星；(b)A 星演化速度快，率先到达红巨星阶段，其外壳被 B 星引力拉扯变形，部分物质流向 B 星，在 B 星周围形成吸积盘；(c)A 星发生超新星爆炸，演变为中子星；(d)B 星演化到巨星阶段，膨胀的外壳物质被致密的 A 星吸引；(e)B 星发生超新星爆炸；(f)B 星残留质量小于 A 星，所以体积较大。

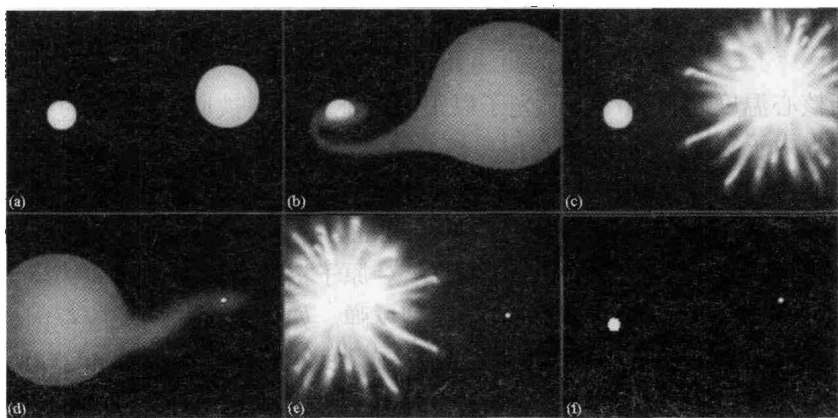



图 4–22 密近双星的演化示意图

恒星的死亡抛射出大量物质，这些物质逐渐弥漫在宇宙空间中，以气体或尘埃的形式成为新一代恒星的原材料。这些物质中有丰富的比氢和氦更重的元素，特别是比铁重的元素只能在超新星爆发中产生。同时超新星爆发的冲击波也是新一代恒星形成的动力，它引发附近星际物质引力聚集，走向恒星诞生之路。

思考与练习

1. 什么叫恒星？如何理解恒星的恒？测定恒星的距离有哪些方法？
2. 如何对恒星进行大小测量？恒星质量测定有哪些方法？
3. 恒星的光谱给人类带来哪些信息？恒星的化学组成和规律有哪些？
4. 什么叫恒星的自行？
5. 恒星的形成和演化经历哪些阶段？

第五章　银河系与河外星系

太阳及其周围数以千亿的恒星聚集在一起，连同恒星际的尘埃、气体，形成了一个庞大的天体系统——银河系。人类认识宇宙的历程中，非常重要的一个飞跃就是把目光投向银河系。随着观测技术的进步，人类对银河系的认识正越来越深刻。银河系之外还有为数众多、各具特色的河外星系，它们再组合成各级星系集团乃至我们所观测到的全部宇宙。

第一节　银河系

夏季的无月晴夜，远离城市灯光的人们可以在天空看到极为壮观的银河(图5-1)。它看起来是一条淡淡宽宽的光带，像一道拱门，从北偏西到南偏东横贯天穹。在望远镜中可以分辨出银河是由许许多多的恒星汇集在一起而形成的，由于这些恒星距离我们太远而无法用肉眼辨认出来，再加上星际间的尘埃会消光，因此银河看起来像一条烟雾笼罩着的光带。在望远镜发明之前的漫长历史里，世界各国的人们有着各种各样的神话故事来解释这条云雾般的神奇光带。我国古代把银河想象成天上的河流。先秦时期银河被称为“漢”(汉)，意指水的精气，“银河”是隋唐至今的传统称呼。在著名的神话传说“牛郎织女”中，银河是王母娘娘为分隔牛郎织女而用玉簪划出的一条大河。在古代希腊神话中，银河被想像成“奶路”(Milky Way)，是众神之神宙斯的妻子希拉的乳

图5-1 壮丽的夏季银河

汁流淌而成的。宙斯与一个民间少女相爱并生下一子，为了让这个孩子能够长成最伟大的勇士，宙斯趁希拉睡着的时候，偷偷地把这个小孩放在希拉身旁，让他吮吸希拉的乳汁，惊醒了的希拉发现吃奶的不是自己的儿子，生气地将孩子推开，喷射出来的乳汁便成了银河。古代印度人则把银河视为一条超度亡灵、通往西天极乐世界的大道。在芬兰神话中，银河被称为鸟的小径，因为当地人注意到候鸟在向南方迁徙时，是靠着银河来指引的，他们认为银河才是鸟真正的居所。在瑞典，银河被认为是冬天之路。古代的亚美尼亚神话称银河为麦秆贼之路，叙述有一位神祇在偷窃麦秆之后，企图用一辆木制的运货车逃离天堂，但在路途中掉落了一些麦秆。

实际上，由于所处纬度差不多，古代中国人和希腊人看到的是同一段银河，经过的主要星座有人马、天鹰、天鹅、天琴、仙后、英仙、御夫和麒麟座等。地平以下，银河一直延伸到南半天球的南船和南十字等星座，环绕整个天空。尽管如此，银河并不是一个完全规则的光带，它宽窄不一，亮暗有别。最宽的地方有 30°，窄的地方只有 4°～5°。夏秋季节银河较亮，冬春季节则较暗淡，银河最亮的部分位于人马座，与之相对的御夫座位置的银河则逊色许多，还有些部分则非常暗，如天鹰、天鹅座以南的大分叉和南十字座附近的“煤袋”。

一、银河系的发现

现在我们知道，银河(Milky Way)是银河系(Galaxy)在天球上的投影，银河系则是以银河命名的星系。银河系的发现经历了漫长的过程。1609 年，伽利略用他自制的望远镜对准银河，发现银河是由恒星组成，揭开了银河神秘的面纱，也开启了科学研究银河的大门。18 世纪中叶的瑞典学者斯维登堡、英国天文学家赖特、德国哲学家康德认为银河里的恒星和肉眼所见天空上其他所有恒星共同组成了一个庞大的、磨盘状的天体系统，太阳也在其中。

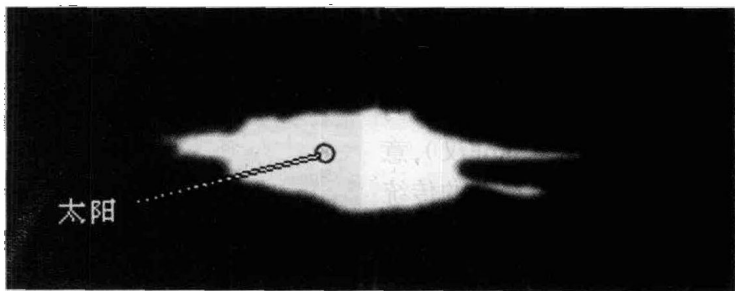



图 5-2 赫歇尔的银河系模型

1776 年，英国天文学家威廉·赫歇尔开始了一个雄心勃勃的计划。他把北半天球划分成 1 083 个天区，系统地进行恒星计数研究。经过近十年的辛勤工作，

他一共观测了 117 600 颗恒星，取得了重大的成绩。赫歇尔也因此被人们称为恒星天文学之父。通过分析这些恒星的位置和距离数据，他发现，离银道面越近，恒星的数目越多越密集。1785 年，赫歇尔提出了一个银河系模型，他认为银河系确由肉眼可见的恒星与银河共同组成，是一个扁平的、边缘参差不齐的恒星系统，太阳位于银河系的中心（图 5-2）。

赫歇尔的银河系模型在今天看来并不完全正确，但是它奠定了银河系概念的基础，使人们的视野从太阳系和彼此相互独立的恒星一下子扩展到广袤的银河系，是人类认识宇宙历史上一个重要的里程碑。

在发现银河系之后，天文学家们开始转而研究银河系的大小。而这必须借助于观测技术和方法的进步。19 世纪下半叶起，天文学家开始用照相的方法观测恒星，大大提高了恒星位置的精确度；同时一些测量恒星距离的方法已经被掌握并得到了运用。关于银河系的大小，有过长时间的争论，其中比较有影响的是卡普坦的小银河系模型和沙普利的大银河系模型（图 5-3）。

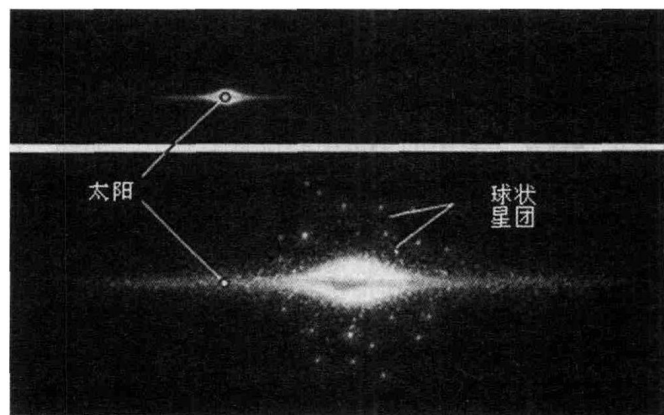



图 5-3 上：卡普坦的"小银河系"模型；下：沙普利的"大银河系"模型

荷兰天文学家卡普坦利用天文台拍摄的天体照相底片，测量恒星的位置和亮度，进行恒星计数的研究。他在 1920 年和 1922 年发表的研究成果被后人称为卡普坦的小宇宙，即银河系是一个由恒星组成的盘，直径为 5.5 万光年，厚度为 1.1 万光年，包含 474 亿颗恒星，太阳靠近银河系中心，银心在仙后座方向。卡普坦的银河系尺度偏小主要原因有两个：一是当时只有极少数由视差测量得出的较近恒星的距离值精度较高，以此来估算银河系的大小是远远不够的，因此他基于自己提出的二星流理论，假定某个恒星群的运动速度是一样的，则该星群中远处的恒星自行小，近处的恒星自行大，由此他得到数千颗恒星距离值，但是这些数值是很粗略的。二是他虽然对银河系内无处不在的星际介质及其消光作用表示承认，认为"哪怕是很小的（星际介质对光的）吸收也将改变我们对恒星在天空

中分布的认识。"但是他并未重视星际吸收，没有将它列入自己的模型中去，导致了错误的结论。

与卡普坦利用恒星来研究银河系不同，美国天文学家沙普利利用球状星团来研究银河系。1918年，沙普利用威尔逊山天文台2.5m望远镜研究当时已知的100个左右球状星团。他统计出，球状星团在天空不是均匀分布的，其中1/3在人马座内，90%以上位于以人马座为中心的半个天球上。沙普利还使用了早几年勒维特得到的造父变星"量天尺"，他把周期－光度曲线应用于每个球状星团中的造父变星。从这些造父变星的周期和视星等，他可以算出它们的距离。就这样，他定出了各个球状星团的距离，发现它们大致分布在以人马座里一点为中心的球内。经过仔细研究，他提出，各球状星团组成一个天体系统，这个系统的中心在人马座方向，太阳离这个中心约5万光年。他进一步认为，这个系统的中心就是银河系的中心，它的范围约为30万光年，也就是银河系的范围。这个被称为"大银河系"的模型比实际的银河系大了许多，其原因是他最初确定的3个球状星团的距离有误。但是他对太阳在银河系中的位置和银河系中心的方向的判断却是正确的。因此在关于银河系大小的争论中，大多数天文学家认为沙普利的"大银河系"优于卡普坦的"小银河系"。

宛如哥白尼把地球从想象中的宇宙中心位置上赶下台那样，沙普利把太阳从想象中的银河系中心请了出去。这后一个发现不如前一个那样划时代，但它确实标志了星系天文学真正的开端。

二、银河系结构模型

银河系在不同波段有不同的图像(图5-4)。

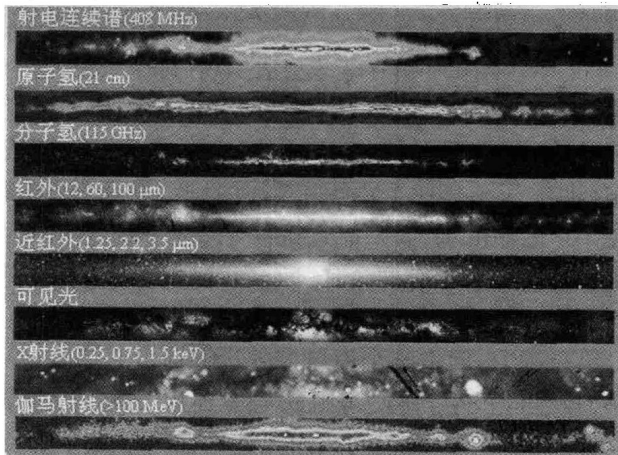



图5-4 不同波段的银河系图像

综合各波段，目前国际公认的银河系模型可用图 5-5 表示。银河系的主体部分是银盘，之外包围着的是银晕。银盘中心部分是核球，中心之外是几条螺旋状的旋臂。核球中心部分是银核。

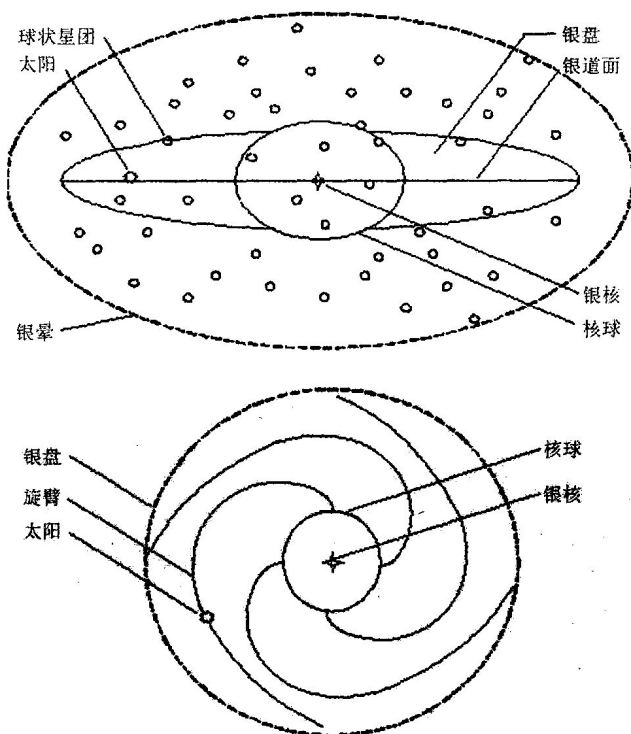



图 5-5 银河系结构示意图（上：侧视图；下：俯视图）

1. 银　盘

银盘聚集了银河系绝大多数的恒星、气体和尘埃，是银河系的主要组成部分。从侧面看，它是一个中央凸起的扁平圆盘，形如铁饼。从俯视看，它像水中的一个旋涡，这是由于银盘在旋转中形成了一些旋臂。银盘的中心平面叫银道面，与天赤道呈 63°.5 交角。在银道面上，银盘直径 8 万光年，中间隆起的呈椭球形的核球的直径约 1 万光年。银盘中间厚，外边薄，靠近核球的地方厚约 0.3 ~ 0.6 万光年，边缘只有 0.1 万光年。

2. 银　晕

在银盘的外面，是一个由稀疏的恒星和星际物质组成的、范围更大的球状区域，直径约为 10 万光年，叫银晕。银晕中的物质密度比银盘中低得多，其中分布着许多球状星团。近年来，根据观测可见物质的运动推断，在恒星分布区之外，还存在一个巨大的大致呈球形的射电辐射区，称为“银冕”，它的半径可达 30 万光年。

3. 银　核

核球位于银盘中心，是银河系里恒星最密集的区域。在核球的中心部分有一个不大的致密区叫银核，银核为扁球形，赤道半径约 30 光年，极半径 20 光年。银核中心处又有一更小的核中之核，称为内核心，也叫银心，半径只有一光年左右。银核能发出强射电辐射、红外辐射、X 射线和 γ 射线。

4. 旋　臂

银河系具有明显的旋涡结构。观测发现，银盘中大量的恒星和星际弥漫物质都高度集中在旋臂上。一般认为银河系有 4 条主要旋臂，太阳位于猎户臂内侧，在银心方向有人马臂和 3kpc 臂，分别距离银心 2.8 万和 1.3 万光年，在反银心方向有英仙臂，距离银心 4 万光年。近年来的研究发现银河系的旋臂有六段，在银心与太阳连线方向上，自银心向外依次是 3kpc 臂、矩尺臂、盾牌—南十字臂、人马—船底臂、猎户臂、英仙臂、外臂（图 5–6）。

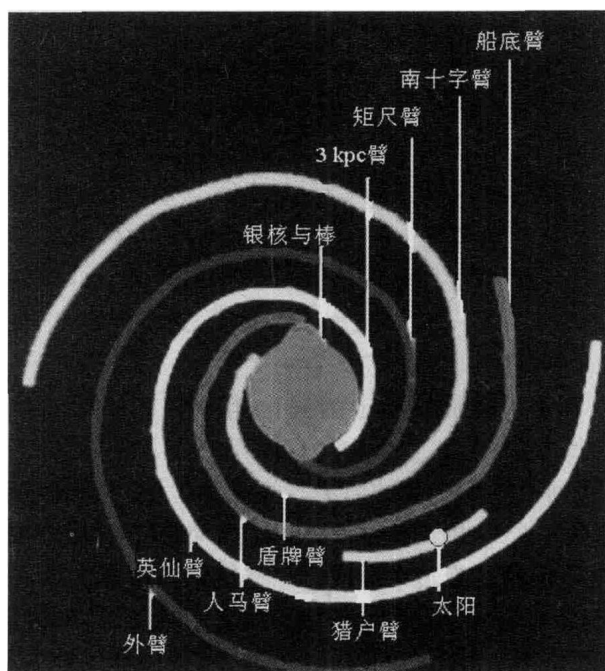



图 5–6 银河系的旋臂

银河的旋臂是怎样产生的？又是怎样长期得以维持的？这些问题困扰了天文学家几十年。20 世纪 60 年代，两位华裔美国天文学家林家翘和徐遐生终于揭开了谜底的一角。他们用 1942 年由瑞典天文学家林德布拉德提出的“密度波”理论较好地解释了星系中的旋涡结构。密度波是由恒星的密集程度显示出来的一种波纹图案。众多恒星绕星系中心旋转，但旋臂并不是它们具体的转动路线。单个

恒星的转动路线是封闭的椭圆轨道，但大量恒星的集体行动受星系中某种引力势的扰动有时被迫趋于集中，有时又趋于扩散，这样便构成了旋涡图案。旋臂(实为密度波型)和星系物质具有不一样的旋转速度，因此在旋臂经过处，物质密度增大，使得气体集聚，形成新的恒星，或者凝聚为固体质点。这就说明了，为什么在星系的旋臂里观测到很多年轻的恒星、星协、星团和较多的气体、尘埃。尽管这个理论引起了人们的重视，但也有许多问题尚待解决，这个理论只证明了密度波可能存在，并不会被较差自转所破坏，因而能说明旋臂形态的持久性，但它没有回答密度波是怎样产生的，也未能说明与旋臂有关的许多观测事实。

太阳是银河系数千亿颗恒星中的普通一员，位于银盘中距银心大约 2.6 万光年，银道面以北 20 光年的位置。假如太阳位于银盘之外，那么我们在地球上就能看到银河系圆盘体的整体，银河将是一个圆面或者椭圆面，占据着某一部分的大片天空。而事实上我们位于银盘内，沿银盘平面向各个方向看去，恒星特别密集，形成了天球上的环形光带——银河。同时，太阳位于银盘的边缘。如果太阳在银河系的中心，那么通过地球的平面会把整个圆盘体分成大致相同的两部分，银河各部分的宽窄和明暗程度也应是大体相同的，而事实上银河各部分的宽窄和明暗程度不同。我们在地球上向银心所在的人马座看去，恒星多而密集，相应地，银河在人马座一段显得特别广阔明亮，反之，向银心相反的方向即御夫座附近看去，恒星就少而稀疏，银河也显得暗淡一些。

有一种假说用太阳系在银河系中运行造成地球轨道扩张来解释冰期的成因。太阳运转到近银心处或旋臂处时，由于该区域密集天体的互相挤压，太阳系会发生收缩，日、地距离缩短，地球上所得太阳辐射热能增加，地球上就会升温，出现温暖期或间冰期；当太阳远离银心或走出旋臂时，由于天体比较稀疏，整个太阳系就会因周围挤压力减少而扩张，日、地距离加大，地球上所得太阳辐射热能减少，地球上就会降温，形成寒冷期或冰期。

银河系到底有多大呢？我们来做一个比拟。按 $1:10^{12}$(一万亿分之一)的比例，太阳的直径只有 1.4mm，好像一粒芝麻，如果这粒芝麻是在上海城区内的，那么最近的比邻星是 40km 以外的昆山市城区的另一粒芝麻；在以上海为中心，以上海至昆山市距离(40km)为半径的圆内，基本上什么都没有，只有这两粒芝麻；织女星直径 5mm，只有一颗黄豆大小，大约在距离 255km 之外的镇江市；红色超巨星参宿四直径 1.4m，大约远在 6 000km 之外的伊朗。这些大大小小的恒星球体，总数有 2 000 亿个，组成一个扁平形状的银河系，直径竟达 90 万千米！小小的地球是在距离芝麻 15cm 处的一粒灰尘，直径只有 12μm，同细菌差不多，不用显微镜是别想看到的。

三、银河系的质量和运动

目前所能观测到的银河系包括2 000亿颗恒星、数以千计的星云、各种类型的星际气体和星际尘埃，它们的总质量大约是太阳质量的1 400亿倍，其中约90%集中在恒星内。太阳轨道以内的质量为1 000亿太阳质量，这是根据银河系转动的数据估算出来的。而通过引力分析的估算认为，可观测物质只占银河系总质量的10%，其余90%是暗物质。这些暗物质几乎不辐射电磁波，因此观测不到，但却可以通过它们的引力所产生的作用觉察到，它们形成的暗银晕估计有6 000亿至3万亿个太阳质量。

最早研究银河系自转的是俄国天文学家斯特鲁维。他于1887年利用自行数据研究银河系自转。当时由于资料少，精度低，因而对银河系自转未能取得肯定的看法。1924年，美国天文学家斯特隆堡根据恒星运动的不对称性提出了银河系自转的假设。以后，林德布拉德又提出不同子系绕银心旋转速度不同的观点。1927年，著名的荷兰天文学家奥尔特从理论上推出了银河系较差自转对恒星视向速度和自行的影响的公式(即奥尔特公式)，并通过恒星视向速度的分析，证实了银河系自转。

20世纪40年代以前，研究银河系自转主要利用光学观测的资料，如视向速度、自行等。但是，这种方法有很大局限性，只能提供离太阳不超过3～4 kpc范围内的资料，离太阳更远时，提供的资料就很不可靠。射电天文兴起以后，人们观测到银河系里有中性氢发出的21cm谱线。根据中性氢21cm谱线的位移，可以求得中性氢云的视向速度，从而推出银河系的自转速度。目前，中性氢21cm谱线射电观测已成为研究银河系自转的最重要的方法。

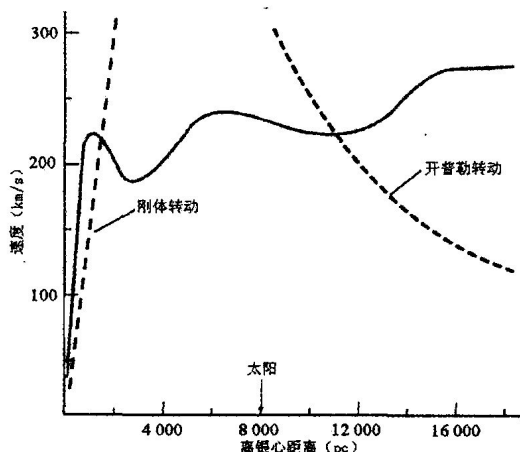



图5-7 银河系自转曲线

根据射电和光学观测的大量资料，进行综合分析后发现，银河系的自转情况比较复杂（图5-7）。在靠近银心的地方，接近于刚体转动。刚体是指大小和形状始终不变的物体，刚体转动是指绕转体围绕中心的旋转运动时各处的角速度都一样。在离银心较远地方，自转的角速度却不再相同了，离中心越远，其角速度越小。太阳处自转速度约220 km/s，这一数值也可以理解为太阳绕银心的公转速度，太阳绕银心运转一周约2.5亿年。太阳轨道之内的天体角速度大，将超过太阳，且超过得越来越多；在太阳轨道之外的天体角速度小，将逐渐落后，且落后得越来越多。就银河系自转的线速度而言，开始随离开银河系中心的距离增大而增大，但达到一定距离后就停止增加，直到银晕中很远处都大致保持不变。

除了自转以外，银河系还在更大的宇宙范围内更大的引力作用下，相对其他星系运动。

四、银　心

银心的概念可以从两方面理解。一个含义为银河系的自转轴与银道面的交点，在讨论银道坐标系时用到。从地球上看，银河系的中心在人马座方向，1950年历元坐标为：赤经17°42′，赤纬28°59′。银心的另一含义是指银河系的中心区域。这个区域内恒星分布十分密集，在离银心10pc处，相邻两颗恒星之间的平均距离仅为0.16光年。而太阳附近的密集程度则小得多，太阳和它最近的邻居——半人马座比邻星的距离有4.2光年。银河系中心究竟是另有别的物质形式，还是简单的高密度恒星集合？

银心与太阳系之间充斥着大量的星际尘埃，所以用光学望远镜难以在可见光波段看到银心。射电天文和红外观测技术兴起以后，人们才能透过星际尘埃，在2μm到73mm波段，测到银心的信息。中性氢21cm谱线的观测揭示，在距银心4kpc处有氢流膨胀臂，即所谓“3kpc臂”（最初将距离误定为3kpc，后虽订正为4kpc，但仍沿用旧名）。大约有1 000万个太阳质量的中性氢，以每秒53 km的速度涌向太阳系方向。在银心另一侧，有大体同等质量的中性氢膨胀臂，以每秒135 km的速度离银心而去。它们应是1 000万至1 500万年前，以不对称方式从银心抛射出来的。在距银心300pc的天区内，有一个绕银心快速旋转的氢气盘，以每秒70- 140 km的速度向外膨胀。在距银心70pc处，有激烈扰动的电离氢区，也以高速向外扩张。现已得知，不仅大量气体从银心外涌，而且银心处还有一强射电源，即人马座A，它发出强烈的同步加速辐射。甚长基线干涉仪的探测表明，银心射电源的中心区很小，甚至小于10个天文单位，即不大于木星绕太阳的轨道。12.8μm的红外观测资料指出，直径为1pc的银心所拥有的质量，相当于几百万个太阳质量，其中约有100万个太阳质量是以恒星形式出现的。

有天文学家认为银河系中心的人马座 A 应该是一个黑洞。根据天体物理理论,黑洞要从周围吸入气体物质。气体螺旋形地掉入黑洞时,会形成一个环状的吸积盘,这个盘就会发出强大的射电波和红外波。人马座 A 就有这样的强射电、强红外和 X 射线辐射。但是,比较谨慎的观点认为,目前只能把人马座 A 看作是大质量黑洞的最佳候选者。

五、银河系的星团

星团(Cluster)是由于物理上的原因聚集在一起并受引力作用束缚的一群恒星,其成员星的空间密度显著高于周围的星场。星团的成员星一般大于 10 个,彼此间有相对运动,而星团作为一个整体也在空间运动着。

星团的命名,一般采用相应的星表中的号码。最常用的是梅西耶星表(见附录“梅西耶天体表”),简写为“M”,它只包括了较亮的星团。较完全的是“NGC”星表,有时还用“IC”星表,这些星表中不仅仅包括星团,还有星云和星系。

星团按形态和成员星的数量等特征分为两类:球状星团和疏散星团。

1. 球状星团

球状星团由于它们的形状是球对称的或接近于球对称的而得名。球状星团内恒星的平均密度要比太阳附近恒星的密度大 50 倍左右,而球状星团中心的密度则要大 1 000 倍。球状星团内恒星十分密集,又离我们十分遥远,因此,即使用现在最大的望远镜也不能把球状星团中大部分成员星分解成单颗的恒星,只有边缘的一部分星可以在长时间曝光的底片上看到。同一个球状星团内的恒星具有相同的演化历程,运动方向和速度都大致相同,它们很可能是在同时期形成的。它们是银河系中最早形成的一批恒星,有约 100 亿年的历史。

球状星团分布在一个巨大的球空间内,这个球的中心与银河系的核心重合。目前在银河系内已发现 100 多个球状星团,它们大部分分布在银晕中,还可能有许多球状星团隐藏在银盘中,只是由于银盘上有大量吸光物质而未被发现,估计银河系约有 500 个球状星团。球状星团以偏心率很大的巨大椭圆轨道绕着银心运转,轨道平面与银盘成较大倾角,周期一般在 3 亿年上下。

在球状星团中有许多变星,其中大部分是天琴座 RR 型变星,其余大部分是造父变星,这两类天体都可以用来较精确地测定球状星团的距离。在一些球状星团中还发现有 X 射线辐射源,因此有人认为在球状星团的核心可能存在黑洞。

著名的球状星团有北半天球最亮的武仙座球状星团以及全天最亮的半人马座 ω 星团(图 5-8)。武仙座球状星团在望远镜中犹如一朵盛开的菊花,由约 30 万颗恒星组成,距离太阳 25 000 光年。半人马座 ω 星团相当于 3 等星的亮度,距离太阳 16 000 光年,星数达百万以上。

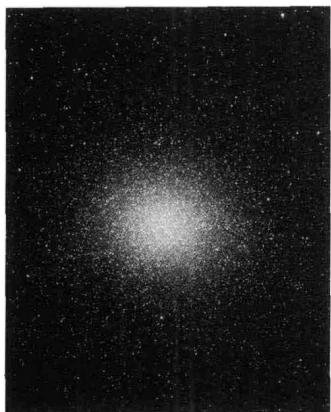



图 5-8 球状星团 NGC5139(半人马座 ω 星团)

2. 疏散星团

疏散星团是指由数百颗至上千颗由较弱引力联系的恒星所组成的天体。疏散星团半径从小于 1pc 到约 10pc,包含的星数从几十个到 1 000 个以上。成员星分布得较为松散,用望远镜观测,容易将成员星一颗颗地分开。在银河系中已发现的疏散星团有 1 000 多个。它们高度集中在银道面的两旁,离开银道面的距离一般小于 600 光年左右。因此疏散星团又叫银河星团。大多数已知道疏散星团离开太阳的距离在 1 万光年以内。更远的疏散星团无疑是存在的,它们或者处于密集的银河背景中不能辨认,或者受到星际尘埃云遮挡无法看见。据推测,银河系中疏散星团的总数有 1 万到 10 万个。

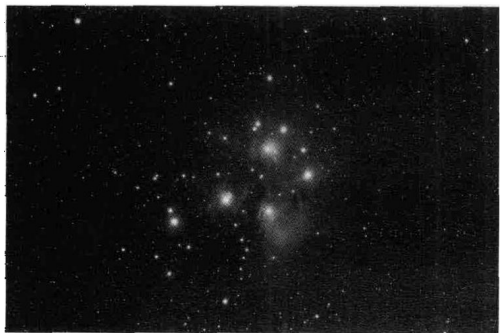



图 5-9 疏散星团 M45(金牛座昴星团)

根据疏散星团成员星在赫罗图上的位置,可以把疏散星团分为三类。第一类是只有主序星,第二类是除主序星外还有一些黄色和红色的巨星,第三类有很多黄色和红色的巨星。疏散星团相对于球状星团而言是比较年轻的,其成员星的种类也比较复杂。年轻的疏散星团都与星云有物理联系,其中的亮星大多是主序星。而年老的疏散星团中有大量的白矮星。此外,许多星团中还有大量的双星和

各种类型的变星。

最著名的疏散星团是金牛座昴星团(图 5-9)。之所以叫昴星团是因为它所在的位置属于我国古代三垣二十八宿中的昴宿(见附录“中国古代星空划分”)。它在梅西耶星表中的编号为 M45。民间常称其为七姐妹星团,因为古时候人们看到的昴星团是由 7 颗星聚在一起的,而现在只能看见较亮的 6 颗了。它是离我们最近也是最亮的几个疏散星团之一。

六、银河系的星云

星云(Nebula)英语词根的原意为“云”,最初是指天空中与恒星不同的形状模糊的云雾状亮斑。按这样的理解,星云包含了除行星和彗星外的几乎所有延展型天体,如星系、各种星团及宇宙空间中各种类型的尘埃和气体等。随着人们对星云的认识不断加深,现在所说的星云基本都是指银河系内区别于恒星的、由气体和尘埃微粒组成的天体。本节所讨论的是后一种星云概念。

在银河系恒星之间广阔无垠的空间并不是真正的“真空”,而是存在着各种各样的物质。这些物质包括星际气体、尘埃和粒子流等,人们把它们叫做星际物质。星际物质在宇宙空间的分布并不均匀。在引力作用下,某些地方的气体和尘埃可能相互吸引而密集起来,形成云雾状的“星云”。星云一般都比较暗弱,人们用肉眼能看见的只有猎户座大星云。但是如果通过大口径的望远镜观测,就能见到许多的星云,一个个多姿多彩,十分美丽。

同恒星相比,星云具有质量大、体积大、密度小的特点。一个普通星云的质量至少相当于上千个太阳,半径大约为 10 光年。星云常根据它们的位置或形状命名,如猎户座大星云,就是位于猎户座的亮星云;哑铃星云则是位于狐狸座的形似哑铃的星云。

星云按其形状,可分为弥漫星云和行星状星云。按发光的性质,又可分为发射星云、反射星云和暗星云。本节按星云与恒星的演化关系将星云分为弥漫星云、行星状星云和超新星遗迹等三种类型。

1. 弥漫星云

弥漫星云是指具有不规则形状,没有明确边界的星云。这类星云比行星状星云大得多,平均直径为几十光年,但是亮度更低,密度更小,每立方厘米只有 10~100 个原子。质量大小不一,大的可达太阳质量的数千倍,小的只有太阳质量几分之一,大多数为太阳质量的 10 倍。弥漫星云在银河系内的分布不均匀,大多集中在银道面附近。弥漫星云分为亮星云和暗星云,其中亮星云又有发射星云和反射星云之分。

亮星云的发光方式有两种。当星云里面或者附近有温度较高的恒星存在时,

星云气体吸收了恒星的强紫外辐射并激发出可见光，其光谱表现为很弱的连续背景上有许多发射线，表明星云中的气体处于低压状态，本身正在发光。这种星云因此而得名叫做发射星云。发射星云由气体和尘埃组成，前者估计占星云总质量的99%，后者只有1%。这一类星云的代表有著名的猎户座大星云、天鹅座北美洲星云（图5-10）等。而当星云里面或者附近的恒星温度较低，紫外辐射太弱，不能激发星云气体发光时，星云就靠其内部的尘埃粒子反射或散射周围星光，其光谱表现为与照亮星相似的吸收线光谱。这一类星云的代表是金牛座昴星团星云（图5-11）。反射星云照亮星从早B型到G、K型（见恒星光谱分类）都有，多数为B1～B8型，而发射星云的照亮星都早于B1型；另一方面，有些照亮星为B1型的亮星云，具有过渡光谱型，即同时存在发射线和吸收线。也观测到一些混合型的亮星云，即在同一个星云里，一部分表现为发射星云，另一部分表现为反射星云。由此可见，发射星云和反射星云在物质组成上并没有本质区别，它们之间的不同光谱特征是由照亮星的类型决定的。它们都属于亮星云。

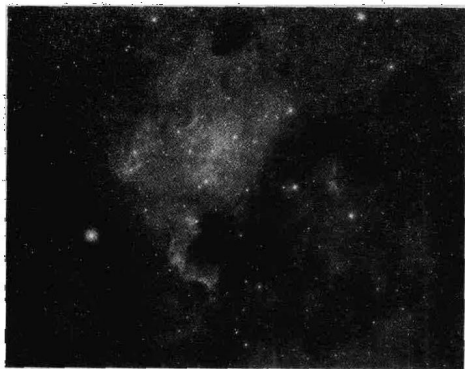



图5-10 发射星云NGC7000（天鹅座北美洲星云）

图5-11 反射星云NGC1435（金牛座昴宿五星云）

如果星云附近没有恒星，气体不能发光，尘埃也无从反光，或者光度不足以为人眼(包括使用望远镜)所见，就成为暗星云，只能在它身后的亮背景衬托下才能被看见。赫歇尔父子于1784年首次注意到亮的银河中有一些黑斑和暗条。开始他们以为这是银河中某些没有恒星的洞或者缝。后经仔细的观测和研究发现，这种现象并不是没有恒星的表现，而是由于在这些恒星的前面有一些不发光的弥漫物质将恒星的光遮挡而造成的。暗星云和亮星云并没有本质上的不同，只是暗星云所含的尘埃比例更大。射电和红外观测表明，有很多亮星云实际上是一个更大的暗星云的一部分。著名的暗星云有猎户座马头星云(图5-12)、蛇夫座S状星云、南十字座煤袋星云等。

图5-12 暗星云NGC2024(猎户座马头星云)

天文学家已经观测到多个正在孕育恒星的星云，如猎户座大星云、巨蛇座鹰状星云、人马座三叶星云等。根据大多数天文学家都认同的恒星演化理论，恒星是由极其稀薄的星际弥漫物质凝聚成星云并进一步收缩而形成的，可以说，弥漫星云是恒星形成的摇篮。

2. 行星状星云

行星状星云呈圆形、扁圆形或环形，在望远镜中看去，它具有像天王星和海王星那样略带绿色而有明晰边缘的圆面。1799年，威廉·赫歇尔发现这类天体后，称它们为行星状星云，其实这个名称并不确切，因为已发现的1 500个行星状星云中，只有很少数形如大行星，而有一半以上形如恒星，只有通过光谱特征才证认为行星状星云，不过这个名字还是沿用下来了。这类星云与弥漫星云在性质上完全不同，它们是小质量恒星演化到晚期，核反应停止后，走向死亡时的产物。

大多数行星状星云都呈圆环状或圆盘状，在星云的中央部分有一个很小的

核心，是温度很高的中心星，但行星状星云并不包括中心星本身。因星云的中间部分较稀薄，一般看不到，而外缘部分较浓密，可以看得到，或者还有一个原因，中间部分被那颗亮星照得较亮而变得透明，但外缘不甚亮，故不透明。用大望远镜观察发现行星状星云有纤维、斑点、气流和小弧等复杂结构。行星状星云是气体星云，在中心星强烈的紫外辐射的激发下发光的，因此行星状星云都是发射星云。行星状星云的化学组成和恒星差不多，质量一般在 0.1 ~ 1 个太阳质量之间，密度在每立方厘米 100 ~ 10 000 个原子，温度为 6 000 ~ 10 000K，中心星的温度高达 30 000K 以上。行星状星云在不断地膨胀，速度为每秒 10 ~ 50km，因此它的寿命一般都不长，平均寿命约为 30 000 年左右。这类星云出现，象征着恒星已到晚年。在银河系中，大约有 10 亿 ~ 100 亿个恒星经历过行星状星云阶段。因此，这种天体很可能是一种普遍存在的天体。而现在银河系中的大部分恒星，很可能都要经过行星状星云而后才“死亡”。行星状星云主要分布在银道面附近，估计银河系内其总数达 1 万 ~ 10 万个。它们一般都比较暗，再加上受到星际消光的影响，大量的行星状星云被暗星云遮蔽而难以观测。

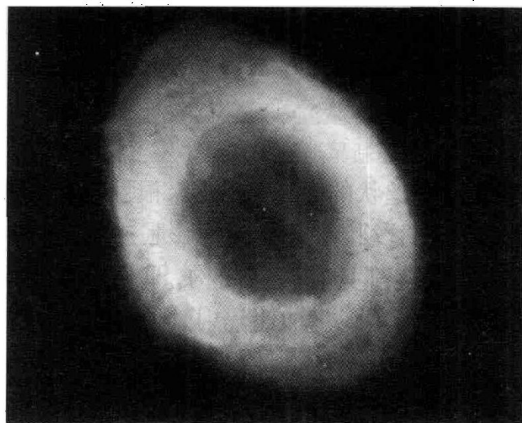



图 5-13　行星状星云 M57（天琴座环状星云）

银河系中行星状星云的代表有天琴座环状星云（图 5-13）、狐狸座哑铃星云、天龙座猫眼星云等。在银河系的近邻星系中也发现了不少行星状星云，如大麦哲伦云中有 400 多个，小麦哲伦云中有 200 多个，仙女座大星云中有 300 多个。

3. 超新星遗迹

超新星遗迹也是一类与弥漫星云性质完全不同的星云，它们是超新星爆发后抛出的气体形成的。超新星爆发是大质量恒星晚期演化的必然过程。与行星状星云一样，这类星云的体积也在膨胀之中，最后趋于消散。

超新星爆发时，星的外层向周围空间迅猛地抛出大量物质，这些物质在膨胀

过程中和星际物质互相作用，形成丝状气体云和气壳，遗留在空间，成为非热射电源，这就是超新星遗迹。星的残骸可演化为中子星或黑洞。最著名的超新星遗迹是金牛座蟹状星云(图 5-14)。它是由一颗在 1054 年爆发的银河系内的超新星留下的遗迹。我国史书《宋会要》记载："至和元年五月晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。"说的是公元 1054 年 7 月 4 日清晨，天空中出现了一颗特别明亮的超新星，在天关(中国古星名)附近，白天也能看见它亮如金星，光芒四射，一直持续了 23 天。

图 5-14 超新星遗迹 M1(金牛座蟹状星云)

大多数超新星遗迹具有丝状的亮云或壳层。根据自行和视向速度得知，丝状物都沿径向向外膨胀，不同的丝状物有不同的膨胀速度。各种射电波段上的亮温度分布观测表明，超新星遗迹都具有壳层结构，即源的外层辐射强，向内迅速减弱。目前普遍认为其辐射性质是同步加速辐射，即高能电子绕着磁场高速旋转所发出的辐射。

统计表明，从银心到 26 000 光年以内，线直径小于 98 光年的超新星遗迹面密度近似一常数(每千万平方光年约 0.5 个)。离银心 26 000 光年以外，其面密度迅速下降；到 33 000 光年时，下降到上述常数值的一半。离银心 52 000 光年以外就没有超新星遗迹了。另外，这种遗迹有明显地集中于银道面的倾向，近银心处和旋臂上容易出现超新星遗迹。

恒星是星云在引力作用下，收缩、聚集、演化而成的。恒星生命的晚期，又可以大量抛射物质到星际空间，成为星云的一部分原材料。所以，恒星与星云在一定条件下是可以互相转化的。

七、星　族

按恒星在银河系里的分布、所处的演化阶段和物理特性，可将它们分为两个

星族。星族Ⅰ分布在银河系的银盘和旋臂上，主要是青白色星、主序星和疏散星团里的星。星族Ⅱ分布在球状星团里、椭圆星系里和旋涡星系的核心部分，包括红巨星、天琴RR型变星和亚矮星。星族Ⅰ包含丰富的比氢和氦重的元素，可能较年轻。星族Ⅱ仅含有少量的重元素，天文学家称它们为贫金属星，它们都很古老，但仍旧含有源自第一代恒星的少量碳、氧、硅以及铁。这种差别可以用恒星演化过程加以解释，恒星进入晚年期后向外抛射物质，使恒星内部核过程所形成的重元素渗入星际物质中去，这种被“加重”的星际物质形成的恒星，其重元素含量就会相应增高，因此越是年轻的恒星包含的重元素就越多。星族概念在研究银河系的起源和演化问题上起着重要作用。

星族的概念最初是由德国天文学家巴德在1944年基于星团赫罗图的研究提出的。1957年，在梵蒂冈召开的一次国际学术会上，按照恒星的空间运动速度、距银道面的距离、向银心的聚集程度、氦含量和年龄等参量，把星族又细分为五类：晕星族（极端星族Ⅱ）、中介星族Ⅱ、盘星族、中介星族Ⅰ和旋臂星族（极端星族Ⅰ）。

晕星族由银河系中最古老的天体所构成，其中包括球状星团、亚矮星和周期长于0.4天的天琴座RR型变星（周期更短的天琴座RR型变星属盘星族）。

中介星族Ⅱ的主要代表是垂直于银道面速度超过30公里每秒的高速星以及周期短于250天、光谱型早于M5的长周期变星。

盘星族包括银核内的恒星、行星状星云和新星。

中介星族Ⅰ包括光谱中出现较强的金属线的恒星和A型星。

旋臂星族集中分布在银道面附近，银面聚度最大，主要为旋臂中的年轻星如O型星、B型星、超巨星以及一些疏散星团等。

第二节 河外星系

在银河系之外，还有许许多多与银河系类似的星系，称为河外星系。银河系与河外星系统称为星系（galaxy）。星系是由几十亿至几千亿颗恒星、星云和星际物质组成的庞大天体系统，是构成可观测宇宙的基本成员。我们的银河系、仙女座大星云、大小麦哲伦云都是星系。已知视星等亮于20等的星系有2 000万个，亮于23等的则有10亿个，现在人类已经可以观测到1 250亿个星系。最远的星系估计距离可达150亿光年，对它们的观测使天文研究的范围扩展到以百亿光年为尺度的广阔空间，并可追溯到百亿年前发生的事件，成为现代宇宙学的重要支柱。按星系形态，星系可被分为椭圆星系、旋涡星系、棒旋星系、透镜星系和不规则星系等。按星系性质，星系被分为正常星系和活动星系或特殊星系。活动星

系和活动星系核是当今最活跃的研究领域。星系的形成和演化则是研究历史短、流派众多、尚未成熟的领域。

一、河外星系的发现

18 世纪中叶，著名的德国哲学家康德在其名著《宇宙发展史概论》中指出，银河系不是唯一的，宇宙中还有无数个像银河系一样的天体系统，天空中那些云雾状的“星云”很可能就是这样的天体系统。这一大胆的猜想，在经历了 180 多年的反反复复的争论之后，才最终得到证实。

1786 年，英国天文学家威廉·赫歇尔观测了许多梅西耶天体，发现其中大多数都能分解为恒星，于是他宣布这些“星云”确实是银河系外面的其他星系（即后来所谓的宇宙岛），其实他分解开的“星云”是一些球状星团。后来他又观测到许多不能分解为恒星的星云，于是他又否认了自己原先提出的星云是河外星系的主张。由于赫歇尔威望极高，很长时间内没有不同观点出现。

1845 年，英国天文学家帕森斯用更大的望远镜分解了许多赫歇尔未能分解的星云，由此认为只要望远镜足够大，星云都可以分解为恒星，所有的星云是河外星系。在 1850 年出版的《宇宙》第三卷中，德国科学家洪堡提出了“宇宙岛”一词，他把康德所说的宇宙中无数个像银河系一样的天体系统，比作大海中的小岛。因为它形象地表达了星系在宇宙中的分布，后来就被广泛采用。

1864 年，英国天文学家哈金斯对星云进行分光观测，发现多数星云的光谱线与气体光谱一样，都是明线光谱，证明星云都是由发光气体而非恒星构成的。于是宇宙岛之说又遭全盘否定。其实他得到的光谱是诸如猎户座大星云等银河系内的亮星云的。

天文学家利用分光方法进一步观测和研究后发现，最初被称为“宇宙岛”的云雾状天体，一类是由尘埃和气体组成的银河系内真正的气体星云，叫做“银河星云”；还有一类是由密集恒星组成恒星集团，称为“河外星云”，它们往往具有旋涡结构，因而又叫做“旋涡星云”。因此，宇宙岛的争论进一步具体为：旋涡星云到底是银河系内的天体，还是银河系外的所谓宇宙岛？同时人们认识到，宇宙之争的反反复复，其关键问题在于人们没有抓住事物的本质，不能仅仅依靠把星云分解为恒星或者从光谱特性来判断宇宙岛存在与否，真正解决问题的办法是测定银河系的大小和旋涡星云的距离。

到了 20 世纪初，宇宙岛之争仍在继续。当时支持派的代表是在测定天体距离方面颇有成就的美国天文学家柯蒂斯。他利用仙女座大星云等中发现的新星来估测这些星云的距离，其方法是假定这些星云中发现的新星最亮时与银河系爆发的新星有相同的真实光度，前者只是因为距离较远才显得暗弱，由此可推算

出旋涡星云的距离。结果表明，这些星云远远超出银河系的范围。柯蒂斯说，“作为银河系以外的星系，这些旋涡星云向我们指示了一个比我们原先所想象的更为宏大的宇宙。”

反对派的代表是曾对银河系结构做出了正确解释的沙普利。他指出用新星来测定的距离并不很可靠。他认为“旋涡星云与其它星云一样都是银河系的成员。”他的证据是一位荷兰天文学家范玛南所提供的观测结果：旋涡星云的距离只有数千光年，都在银河系的范围以内。范玛南的观测数据后来被发现是错误的。

为了解决这一争论，1920年4月，美国国家科学院举行了一次题为“宇宙尺度”的辩论会，由威尔逊山天文台台长海尔主持，会上沙普利和柯蒂斯两人就银河系的大小和旋涡星云的真相展开了论战，这就是天文学史上有名的沙普利—柯蒂斯大辩论。

这场大辩论当时胜负未分。但不久之后，这个难题终于被美国著名天文学家哈勃解决了。1923年，哈勃用美国威尔逊山天文台口径2.54m的反射望远镜拍摄仙女座大星云的照片，由于这架当时世界上最大的反射望远镜的惊人分辨本领，照片上该星云的外围已被分解为恒星，在这些恒星中他证认出第一颗造父变星。翌年，他在仙女座大星云中证认出更多的造父变星，并在三角座星云和人马座星云中也发现了一些造父变星。造父变星的最重要特性是它们的绝对星等与光变周期之间存在一种规律，利用“造父变星周光关系”可以推算出这些变星的距离，进一步就可以确定出它们所隶属星云的位置了。这是一条揭开旋涡星云本质之谜的正确途径。哈勃计算出仙女座大星云的距离约为90万光年，而当时已知银河系的直径为10万光年。由此哈勃确认仙女座大星云是远在银河系以外的独立的星系。

1944年，德国天文学家巴德把仙女座大星云的核心部分也分解为恒星，更进一步证实了它确实是与我们银河系一样的恒星系统。这时离开康德最早提出河外星系的概念已经180多年了。现在，天文学家们探测到数以十亿计的星系，河外星云的称呼应当改为河外星系，而“宇宙岛”一词也已成为历史。人们翻开了探索宇宙的新的一页，人类的视野从银河系扩展到了河外星系乃至整个宇宙。

二、星系的分类

对河外星系的研究发现，它们形态不同，特点各异，宇宙中没有两个星系的形状是完全相同的，每一个星系都有自己独特的外貌。但是由于星系都是在一个有限的条件范围内形成，因此它们有一些共同的特点，这使人们可以对它们进行大体的分类。比如按照质量和光度的大小，星系分为巨星系和矮星系；按

照性质和活动强度，星系分为相对平静的正常星系和相对活跃的特殊星系或称活动星系。

1. 哈勃分类

在多种星系分类系统中，应用得最广泛的一种是哈勃1926年提出的星系分类法。其分类判据是：①核球相对于星系盘的大小；②旋臂的特征；③旋臂和（或）星系盘分解为恒星和电离氢区的程度。哈勃据此把星系分成三大类：椭圆星系、旋涡星系和不规则星系。后细分为椭圆星系、旋涡星系、棒旋星系、透镜星系和不规则星系五大类（图5-15）。

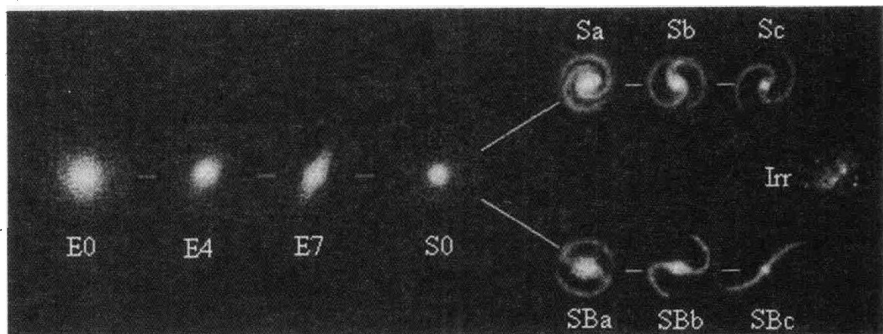



图5-15 哈勃星系分类示意图

（1）椭圆星系

符号为E。呈圆球型或椭球型。中心区最亮，亮度向边缘递减。椭圆星系按其椭率大小分为E0、E1、E2、E3、…E7共八个次型，E0型是圆星系，E7是最扁的椭圆星系。数字只代表星系出现在天空中的形状，与真实的几何形状无关。椭圆星系的直径约1～150 kpc。椭圆星系的质量差别非常大，质量最小的矮椭圆星系和球状星团相当，而质量最大的超巨型椭圆星系可能是宇宙中最大的恒星系统。成员星中年轻的较少，主要由星族Ⅱ天体组成，没有典型的星族Ⅰ天体蓝巨星，没有或仅有少量星际气体和星际尘埃。椭圆星系质光比约为50～100，而旋涡星系的质光比约为2～15。星系的质量与光度之比叫做质光比。质光比大，说明椭圆星系中包含大量对质量贡献大但对光度贡献小的天体，即拥有大量徒有质量而发光微弱的成员，其产能效率远远低于旋涡星系。

（2）旋涡星系

符号为S。呈旋涡结构，有明显的球状或近球状核心，核球外是一个薄薄的圆盘，有几条旋臂。一般在S后面另加a、b、c等英文字母，用来表示旋臂的开展程度和核球的相对大小，Sa型的核球相对最大，旋臂缠得最紧，Sc型的核球相对最小，旋臂展开最充分，Sb介于中间。旋涡星系有较多的气体和尘埃，主要集中于旋臂和星系盘。

(3) 棒旋星系

符号为SB。与旋涡星系类似,但是核心不是球形,而是棒状,或者是贯穿着核心的棒状,旋臂从棒的两端生出。棒旋星系的核心常为一个大质量的快速旋转体,运动状态和空间结构复杂,棒状结构内部和附近的气体和恒星都有非圆周运动,星系盘在星系的外部居主要地位,占星系质量的很大一部分。棒旋星系在质量、光度和光谱上,在成员天体的星族类型,气体和尘埃的分布等方面,都和正常的旋涡星系相似。一般也在SB后面另加a、b、c等英文字母,用来表示旋臂的开展程度和核球的相对大小。

(4) 透镜星系

符号为S0或SB0。是椭圆星系向旋涡星系或棒旋星系过渡的一种星系。形状扁平盘状,比椭圆星系E7型更为扁平,核球及其外面部分很像旋涡星系和棒旋星系,区别于椭圆星系;但同时旋臂结构不明显,也没有很多气体或尘埃,区别于旋涡星系和棒旋星系。

(5) 不规则星系

符号为Irr。外形不规则,没有明显的核和旋臂,没有盘状对称结构或者看不出有旋转对称性。不规则星系分为Ⅰ型和Ⅱ型两类。Ⅰ型的是典型的不规则星系,除具有上述的一般特征外,有的还有隐约可见不甚规则的棒状结构。它们是矮星系,体积小,长径的幅度为2~9千秒差距,质量为太阳的1亿倍到10亿倍,也有可高达100亿倍太阳质量的。星族成分和Sc型螺旋星系相似,O-B型星、电离氢区、气体和尘埃等年轻的星族Ⅰ天体占很大比例。Ⅱ型的具有无定型的外貌,分辨不出恒星和星团等组成成分,而且往往有明显的尘埃带。一部分Ⅱ型不规则星系可能是正在爆发或爆发后的星系,另一些则是受伴星系的引力扰动而扭曲了的星系。

长期以来人们一直以为银河系是一个旋涡星系,Sb型。但最近的观测却发现,它的中央核球稍带棒形。这意味着银河系很可能是一种棒旋星系,SBb型。

从根本上说,哈勃系统是一种形态分类法。它是直接以观测为依据的,切实可行而又稳定不变,因此被广泛采用。哈勃分类第一判据可能同星系前身的角动量分布有关,也同最早期恒星的形成时标有关;第二、第三判据则可能同星系目前的恒星生成率有关。若干特殊星系(如M82,NGC3077,NGC520,NGC2685,NGC3718)不能纳入哈勃分类系统。这些星系的数量只占百分之几。

随着观测技术的进步,各种星系的观测资料在数量上和细节上都有了大幅度的提高和改进。于是人们一方面对哈勃分类提出了一些修订方案;另一方面,又在研究互扰星系、特殊星系以及正常星系若干细节尤其是星系核的基础上,提出了一些新的分类系统,例如沃库勒系统、摩根系统、范登堡系统和阿姆巴楚米

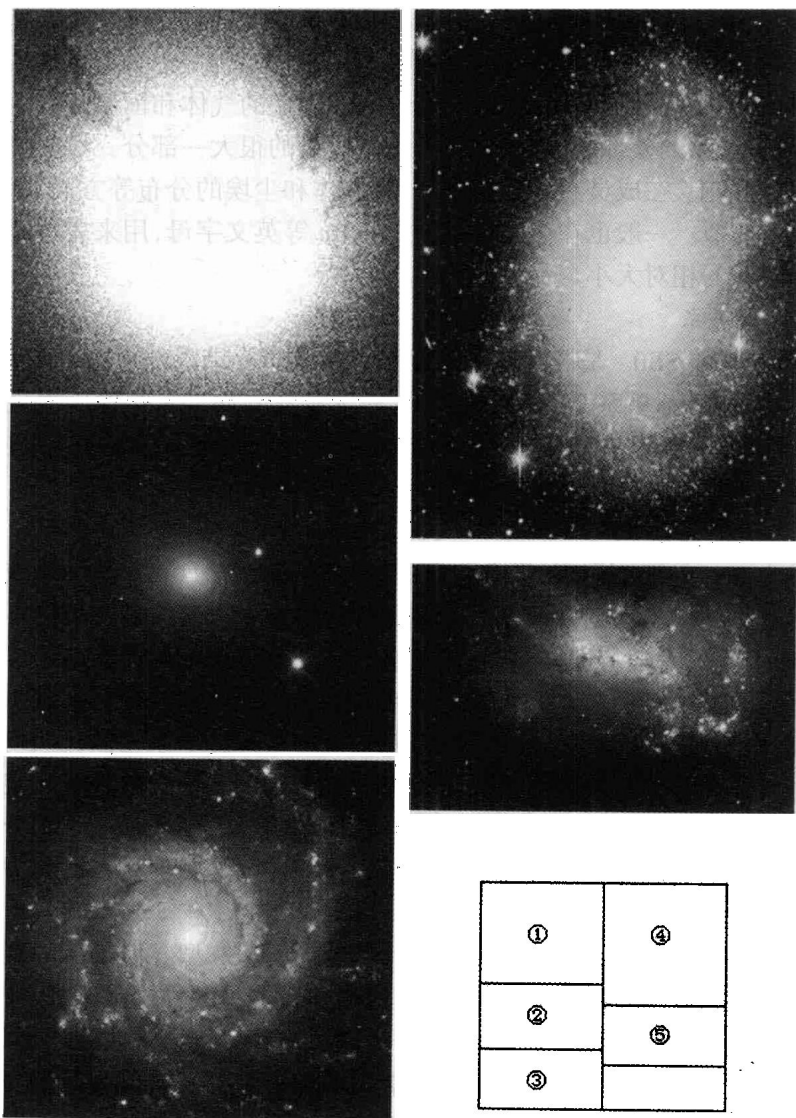
扬系统等。

①NGC 5273——摩根系统 gkD2，哈勃系统 S0/Sa；②NGC 488——摩根系统 kS2，哈勃系统 Sb；③NGC 628(M74)——摩根系统 fgS1，哈勃系统 Sc；④NGC 5204——摩根系统 fI–fS4，哈勃系统 Sc/Ir，沃库勒系统 Sam；⑤NGC 4449——摩根系统 aI，哈勃系统 Ir，沃库勒系统 IBm

图 5–16 几个典型形态的星系

2. 沃库勒分类

1959 年以来，沃库勒多次对哈勃系统提出修订方案。方案的要点是划分四大类、两族、两种和五级。①四大类：椭圆星系(E)，透镜型星系(L)，旋涡星系(S)，

不规则星系(Irr)。其中,透镜型星系等同于哈勃系统中的S0类。②两族:A和B。A族表示正常形态;B族表示棒状;AB表示过渡(混合)形态。③两种:r和s。r种代表旋臂绕成弧状，环成圆形或椭圆形;s种表示旋臂从星系核心或棒端出发，形成"s"状。过渡形态记为rs或sr。④五级:a,b,c,d,m。过渡形态记为ab,bc,cd,dm。a,b和c同哈勃分类,另加进d和m来表示从明显旋臂到非常无序结构之间的过渡级别,d级旋臂断断续续，一块一块的,m级则是像大麦哲伦云那样近乎不规则的星系。

3. 摩根分类

亦称叶凯士系统(因摩根在美国叶凯士天文台工作而得名),分类依据是星系的形状和恒星光谱,以及中心的聚集度。用E、Ep、S、B、I、L、N和D表示形态:E为椭圆,Ep为有尘埃吸收的椭圆,S为旋涡,B为棒旋,I为不规则,L为表面亮度小,N为小而亮的核,D为无旋涡或椭圆的旋转对称。再用前标a,af,f,fg,g,gk和k表示光谱和聚集度,用后标1~7表示表示倾角指数,1为正面,7为侧面。

图5-16是几个典型形态的星系，在不同分类系统中它们被分在不同的类型里。

三、活动星系

活动星系又称特殊星系，是指形态和结构不同于哈勃分类中正常星系的河外星系。这一类星系的特殊性质主要是因星系核的活动和主星系同伴星系之间的相互扰动造成的。活动星系可分为类星体、塞佛特星系、N型星系、射电星系、马卡良星系、致密星系、蝎虎座BL型天体、有多重核的星系和有环的星系等等。这种分类,有的是根据历史情况,有的则是根据发现者的姓氏而命名的。现在已知上述各类之间有重叠、交错的情况。例如,马卡良星系中至少有10%可归入塞佛特星系,N型星系中有很多又属于射电星系。

1. 塞佛特星系

塞佛特星系是星系核有强烈活动的旋涡星系，由美国天文学家塞佛特在1943年发现,它们的主要特征是:①有一个小而亮的恒星状核。②核的光谱显示有很宽而且是高激发、高电离的气体发射线。③有较强的光度和很蓝的连续谱。塞佛特星系可分为两类:Ⅰ型塞佛特星系的光谱与类星体的很相似,最暗的类星体常常在最亮的塞佛特星系光谱内,因此人们常称之为“微类星体”。Ⅱ型塞佛特的形态与Ⅰ型不同,他们大多数没有完整的旋臂,而有明显的喷射物,很可能是经过剧烈爆发后的产物。

2. N型星系

N型星系的名称来自于摩根星系分类法中的一种,以N为符号。与塞佛特星

系相类似，N 型星系中央有亮核，但外围看不出旋涡结构。周围被低亮度的延伸的星云包围，中心亮核的颜色和类星体相似，而延伸云的颜色和亮度分布类似一个巨椭圆星系。

3. 蝎虎座 BL 天体

这是一类具有非常亮的星系核的椭圆星系，它的典型代表是蝎虎座 BL。20 世纪 60 年代以前，蝎虎座 BL 被认为是银河系内一颗光变不规则的特殊变星。1968 年，发现它有很强的射电辐射，后来又发现它还有很强的红外辐射和 X 射线辐射。1974 年确定它不是银河系的成员，而是 10 亿光年以后的河外天体。计算出的绝对星等比银河系和一般其它星系都亮得多，而核的尺度只有几个“光日”或“光时”，比塞佛特星系的核要小得多，而外围是一个巨大的椭圆星系。我们看到的蝎虎座 BL 只是巨大的椭圆星系中非常明亮的核。性质与蝎虎座 BL 类似的天体称为蝎虎座 BL 型天体。其主要特点是：发出强烈的射电、红外和 X 射线；有猛烈的光变，时标为几小时到几月，最亮时比正常星系亮 1 万倍；各波段的辐射都是非热辐射，偏振度很大且有快速变化。

4. 致密星系

光度几乎全部集中于核心区域的星系。这类星系的表面亮度很高，在照相底片上成像很小，刚好能与恒星的像相区别。因瑞士天文学家 F.茨威基在 20 世纪 60 年代编制星系和星系团表的过程中所发现，故又称茨威基星系。按致密程度还可分为一般致密、中等致密、甚致密和极端致密 4 类。致密星系并不构成物理性质单一的一类。它包含许多类型的星系。有的致密星系是正常星系，但表面亮度较高。

5. 马卡良星系

马卡良星系是有超强紫外辐射和反常蓝核的星系，由苏联天文学家 V.E.马卡良在 20 世纪 60 年代发现。马卡良星系主要有两类。第一类占总数的 2/3，称为亮核型，核本身就是紫外连续源，大多为塞佛特星系，其光谱中有宽的发射线。第二类为弥漫型，紫外连续源分散在整个星系内，其中有些是金属含量很低的不规则星系。最近还发现马卡良星系中很多是密近而有相互作用的双重星系。

6. 射电星系

广义地说，有明显的射电辐射的星系，都可以叫作射电星系。狭义地说，射电星系是指射电功率比正常射电星系强 100～1 000 000 倍的星系，又称为特殊射电星系。历史上曾把射电星系当作某种光学特征异常的“活动”星系。现在看来大多数射电星系的光学特征并不特殊。射电星系大多是椭圆星系(E)、巨型椭圆星系(D)、介于二者之间的 ED 星系和超巨型椭圆星系(CD)，不规则星系很少。它们往往是星系团中最亮的成员星系，质量也大。有的射电星系是 N 型星系和塞

佛特星系。很多射电星系都有着奇特的结构,即一个核、一对喷流和一对瓣。

最有名的射电星系有天鹅座 A 和半人马座 A。天鹅座 A 是第一个被发现的射电星系,也是最强的河外射电源,比银河系的射电辐射功率强几百万倍。半人马座 A 距离我们只有 1600 万光年远,是离我们最近的活跃星系。

7. 类星体

类星体被誉为 20 世纪 60 年代天文学四大发现之一。它的主要特点是:小尺度,高能量,大红移,远距离。它们的光学体很小(光学直径 <1"),和恒星很难区别,即使是在 5m 望远镜所拍照片中,它们和恒星一样,都只是一个光点。它们有极亮的表面,在可见光及射电波段都有此特性,可见光绝对亮度超过一般正常星系的 100 倍,而射电强度和天鹅座 A 相当。它们的光谱呈现巨大的红位移量,由哈勃定律推论,它们是极远的蓝色星系。它们的光谱是连续光谱及强烈的发射谱线,测得的类星体的光谱主要有三部分:由同步辐射造成的非热性连续光谱;吸积作用造成极明亮的发射谱线;星际介质造成的吸收谱线。这暗示着类星体可能与黑洞相关。

8. 活动星系核

尽管从目前看来,活动星系的分类并没有一个严格完整的体系,许多类型之间是重叠的,所有的类型也没有涵盖所有的活动星系,但是,凭借着不断进步的观测技术和理论研究,特别是有关活动星系核的研究,天文学家们正在试图建立一个统一体系。

活动星系核(Active Galactic Nucleus,简称 AGN),是指星系核有剧烈活动的星系,是当代天体物理学中最流行和活跃的研究领域之一。与正常星系相比,活动星系核的主要观测特征有:①有一个致密的核区,尺度远小于正常星系,但光度远大于正常星系;②在射电、光学、X 射线、γ 射线等所在波段都有强劲的辐射,包括超额的红外和紫外辐射,而正常星系的辐射主要是在可见光波段;③光谱为连续谱,有亮而宽的原子和离子的发射线;④连续谱和发射线的强度和谱型都有较短时标的变化。

赛佛特星系、N 型星系、蝎虎 BL 天体和类星体都已被证实为活动星系核,一种试图统一射电星系、赛弗特星系、蝎虎 BL 天体和类星体的活动星系核模型逐渐受到普遍认可。这个模型认为,在星系的核心位置有一个超大质量黑洞,在黑洞的强大引力作用下,附近的尘埃、气体以及一部分恒星物质围绕在黑洞周围,形成了一个高速旋转的巨大的吸积盘。在吸积盘内侧靠近黑洞视界的地方,物质掉入黑洞里,释放巨大的能量辐射,其质能转换效率达到 10%以上,远高于氢 - 氦热核反应过程 0.7%的效率,同时形成了物质喷流。而强大的磁场又约束着这些物质喷流,使它们只能够沿着磁轴的方向,通常是与吸积盘

平面相垂直的方向高速喷出。这样一来，活动星系核的能量疑难初步得到解决。这个模型还认为,类星体是很年轻的活动星系核。由类星体具有较大的红移值,距离很遥远这一事实可以推想,我们所看到的类星体实际上是它们许多年以前的样子,而类星体本身很可能是星系演化早期普遍经历的一个阶段。随着星系核心附近"燃料"逐渐耗尽,类星体将会演化成塞佛特星系、射电星系以及像银河系这样的正常星系。

上述模型有天文观测方面的支持。从观测角度看,各活动星系核的确具有连续性质,具体表现为:①形态特征。塞佛特星系是具有亮核的旋涡星系。N星系有一个小的亮核和一个暗的背景,基底星系可能主要是椭圆星系。远的塞佛特星系由于看到盘状结构,也有可能被归为N星系。类星体具有恒星状外貌,只有红移较小的类星体才有可能发现暗的背景。这样,就核与基底星系的亮度之比而言,塞佛特星系,N星系和类星体构成了一个逐渐增强的序列。②颜色。在紫外－蓝、蓝－黄双色图上,塞佛特星系、N星系和类星体也是连续分布的,以类星体紫外超最大,非热辐射最强。③光谱。塞佛特星系和类星体都有高激发的发射线。塞佛特星系有一次电离氧和二次电离Ne的谱线,类星体中的原子可以达到五次电离。两者的连续谱都有非热辐射成分,塞佛特星系的非热同步辐射产生出射电和部分红外辐射，类星体的非热辐射有时可延伸到可见光和红外。④射电辐射。很多射电星系都是N星系,类星体射电源的射电性质与射电星系相似，塞佛特星系也有较强的射电辐射。⑤X射线辐射。在0.5～4.5kev范围内，塞佛特星系的X射线辐射的强度为10^{34}～10^{37}J/s,N星系为10^{35}～10^{38} J/s,蝎虎座BL型天体为10^{36}～10^{39}J/s,类星体为10^{37}～10^{40}J/s,辐射强度有逐渐增强的趋势。⑥光变。塞佛特星系在光学和红外波段有时标为1年到1个月的变化,类星体在光学和厘米波段有时标为几年到几天的变化,两者X射线波段都有几天到几小时的变化。

四、星系的形成和演化

星系的形成演化是个非常复杂的问题,与宇宙早期的结构和演化密切相关。这一课题的研究历史较短,虽流派较多,但远未成熟。

1. 星系的形成

目前较流行的看法是,在宇宙大爆炸后的膨胀过程中,分布不均匀的星系前物质收缩形成原星系,再演化为星系。关于星系前物质,有人认为是弥漫物质,也有人主张是超密物质。弥漫说认为，星系际弥漫物质逐渐集聚成很大的星系际云,然后分裂成较小的云,形成各种大小不同的星系集团。这种说法能够较满意地说明星系的自转、各星族的空间分布和空间运动以及化学组成等方面的差别。

超密说认为，星系最初是超密物质，它抛出的物质形成各星族的恒星、星系盘、星系晕和旋臂，而余下的超密物质形成星系核。超密说与大爆炸宇宙说相适应。关于原星系的诞生，有两派见解，一派是引力不稳定假说，另一派是宇宙湍流假说。两派观点如下：

引力不稳定性假说。宇宙在早期由原子核、电子、光子和中微子等组成，在温度降到 4 000K 以前，处于辐射占优势的辐射时期，此时在各种相互作用中，引力不居主要地位。当温度降到 4 000K 左右，复合时期开始，宇宙等离子体中性化，宇宙从辐射占优势时期开始转入实体占优势时期。在复合时期前后的 30 亿年期间，星系团规模（甚至更小尺度）的引力不均匀性开始出现并逐渐增长。这时，宇宙物质就因引力不稳定而聚成原星系。计算表明，如果天体形成于复合前或复合初期，则先形成星系团或超星系团，再碎裂成星系或恒星；如果天体形成于复合晚期，则先形成 10^5 太阳质量的结构，一部分保留至今成为球状星团，大部分则聚合成星系、星系团。

宇宙湍流假说。在宇宙等离子体物质复合以前，强辐射压可引起湍动涡流。物质中性化后，辐射不再影响物质运动。涡流的碰撞、混合、相互作用产生巨大的冲击波形成团块群，再演变为星系。这一假说较自然地说明了星系和星系团的自转起因。计算表明，实体占优势时期形成的结构物为 10^5 太阳质量；复合时期形成的结构物则是 10^{12} 太阳质量。

两种假说在星系形成的时期上观点比较一致，认为它们大约在 100 亿年前形成的。

2. 星系的演化

对星系的演化有几种不同的见解。早在 20 世纪 30 年代，人们就把形态的序列看成是演化的序列，认为星系从球形开始，因自转而变扁，扁平部分形成旋臂，旋臂逐渐松卷以至消失。换句话说，星系是从椭圆星系，经过旋涡星系，最后演化成不规则星系的。另一种看法也认为形态序列是演化序列，但方向相反：从不规则星系，经过旋涡星系到椭圆星系。即从不规则开始，因自转而获得轴对称，最后演化成球状星系。现在知道，椭圆星系和旋涡星系中都有老年星，而且年龄相差不多。此外，质量、扁度等这些量上的差别也表明，星系的形态序列不是演化序列，各种类型星系彼此不能相互转化。第三种见解认为，演化取决于星系的质量和角动量。第四种观点认为，星系的形态结构的不同，决定于形成时的初始条件（密度、速度、弥散度、角动量分布、温度、湍流、磁场等）的差别。

目前认为星系演化过程的大致轮廓如下：原始星系云在收缩过程中，出现第一代恒星。在原星系的中心区，收缩快，密度高，恒星形成率也高，形成旋涡星系的星系核或形成椭圆星系整体。星系的自转离心力阻止赤道面上的进一步收缩，

并造成不同的扁度。气体的随机运动和恒星辐射加热等因素,使得部分气体未聚合为星胚,并因碰撞作用而沉向赤道面,形成旋涡星系和不规则星系。星系从形成之初就已基本定形并不再显著变化。在几亿年期间,由原星系形成为年轻星系。在此之后的百亿年中,一般而言,星系的演变十分缓慢。除因邻近的伴星系的潮汐作用等因素造成了物质“桥”、“尾”或“剥去”星系外围物质外,星系结构一般无大变化。

对于椭圆星系而言,可能由于初始密度和初始速度弥散度都较大,恒星形成率一开始就非常高,气体几乎全部形成恒星。星系中的恒星是无碰撞的,所以椭圆星系形成后形态基本不变。旋涡星系的第一代恒星诞生率较低,所以有部分气体保留下来。计算表明,不同的初始密度和初始速度弥散度,可以形成核球和星系盘之间大小比例不同的星系,这就可以用来大致解释旋涡星系的 Sa、Sb 和 Sc 三种次型。不规则星系的恒星诞生率更低,至今尚有较多气体遗留下来。

3. 星系的碰撞

有些星系处在引力不稳定状态,相互靠近的星系在引力作用下互相干扰,破坏了星系的正常形态,甚至出现针状的、纤维状的或扫帚状的星系际桥状结构。这种星系对和多重星系称为互扰星系。

比较著名的互扰星系有:“老鼠星系”NGC 4676(图 5-17),位于后发座内,距离我们约有 3 亿光年远。这实际上是两个互相缠绕的星系,都有长长的尾巴,所以被昵称为老鼠星系,它们正在把对方撕开之中。这两个旋涡星系可能已经穿过对方,不过它们应该会不停地互撞,直至完全聚合在一起为止。“带孩子的星系”M51(图 5-18),位于猎犬座,距我们约 3 000 万光年。M51 是巨型旋涡星系,旋涡结构十分明显且有两条对称性很高的旋臂,在中心区域和旋臂上有许多明亮的恒星形成区。它有一个伴星系 NGC 5195(也有人称其为 M51b),其位置在 M51 的北偏东方向,到 M51 的中心的投影距离为 15.5 kpc,有一个类似桥状的结构将这两个星系的旋臂连接起来,表明它们在此前曾发生过相互作用。“触须星系”NGC 4038 & 4039(图 5-19),也叫“天线星系”,位于乌鸦座,距离我们约 6 000 万光年。两个星系的巨大引力使它们的形状发生变化,它们的中间形成了一个被拉长了的重叠区域,在这个区域,巨大的碰撞使众多恒星爆发式产生,同时也触发了新星的诞生。“蝌蚪星系”Arp188(图 5-20),位于天龙座内,距离我们 4 亿 2 千万光年。它引人注目的尾巴是由许多巨大明亮的蓝色星团所组成,长度大约有 28 万光年。据推测,曾有个小而密实的星系从它的旁边经过,并在潮汐力作用下把它的星星、气体和尘埃拉出去了一些,形成一条很怪异但是很壮观的长尾。随着蝌蚪星系的年龄增加,它的尾巴很可能也会消失,而位于长尾的这些星团,会聚集成这个大螺旋星系的小卫星星系。

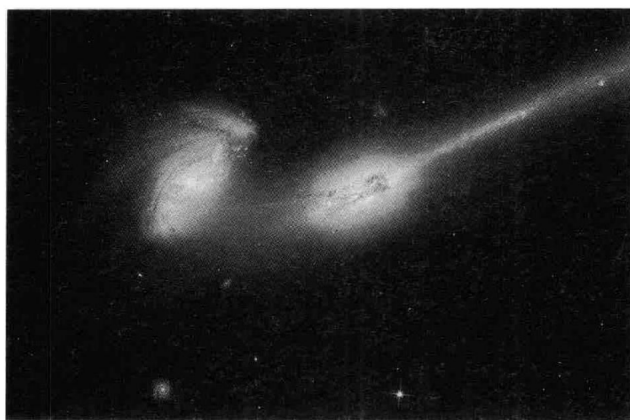



图 5-17 “老鼠星系”NGC 4676

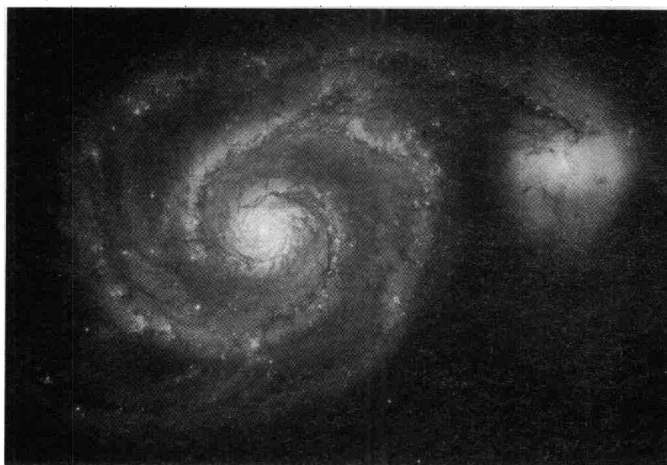



图 5-18 “带孩子的星系”M51 及其伴星系 NGC 5195

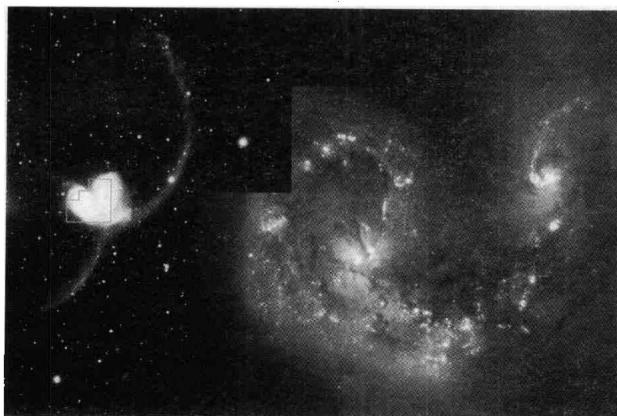



图 5-19 “触须星系”NGC 4038 & 4039

图 5-20 “蝌蚪星系”Arp188

在互扰星系中，有不少都发生了碰撞，星系的碰撞在星系演化中有着非常重要的作用。两个星系相互碰撞的过程，并不会导致两个星系中的恒星相互碰撞。这好比两群蜜蜂互相穿越却没有蜜蜂相撞。不过，一些恒星往往会在引力的作用下，改变了自己原来在星系中的位置或者是运行方向。特别是那些星际间气体星云，会因互相挤压，使物质密度急剧增加，引发一批新的恒星诞生。碰撞的过程长达几十亿年，参与碰撞的星系最终有可能会合并成一个星系，与原来的星系相比，结构上发生很大的变化，比如两个旋涡星系碰撞可能会形成一个椭圆星系，有时，两个椭圆星系相撞会变成两个旋涡星系。

第三节 星系群、超星系团和总星系

星系一般不单独存在，有成团的倾向。而且，星系的这种“群居”习惯比恒星更甚。绝大部分星系（至少 85%以上）都是出现在星系集团中的，那些孤立的星系称作场星系。两个彼此靠近、有物理联系的星系组成的小团体称为双星系，三五个这样的星系集团称为多重星系，几十个则称为星系群，超过 100 个称作星系团。星系群和星系团是同一级别的天体系统。也有一种说法不区分星系群或星系团，将成员数目很多的称为富星系团，数目较少的称为贫星系团。比星系团高一

级的天体系统是超星系团,比超星系团更高一级的天体系统称为总星系。

一、星系群和星系团

银河系所在的星系群称为本星系群。这组星系群包含大约超过50个星系,其重心位于银河系和仙女座星系M31之间的某处。本星系群中的全部星系覆盖一块直径大约1 000万光年的区域。本星系群中两个质量最大的成员是仙女座星系与银河系,它们各自拥有一个卫星星系系统(表5-1,图5-21)。

表5-1 本星系群的主要成员星系

星系	星座	类型	距离(万秒差距)	直径(万秒差距)	质量($M_\odot$)
银河系	——	SBbc	——	3	1.4×10^{11}
大犬座矮星系	大犬座	Irr	1.3	——	1×10^{9}
Sag DEG	人马座	dSph/E7	2.5	0.3	1×10^{9}
大麦哲伦星云	剑鱼座	Irr/ SB(s)m	5.2	0.8	1×10^{10}
小麦哲伦星云	杜鹃座	Irr/SB(s)m	6.3	0.5	2×10^{9}
NGC 6822	人马座	IB(s)m	66	0.17	3×10^{8}
M31	仙女座	Sb	68	5.2	4×10^{11}
M110	仙女座	E6	68	0.42	8×10^{9}
NGC 147	仙后座	dE5	68	0.24	1×10^{9}
M32	仙女座	E2	68	0.21	2×10^{9}
M33	三角座	Sc	72	1.8	2×10^{10}

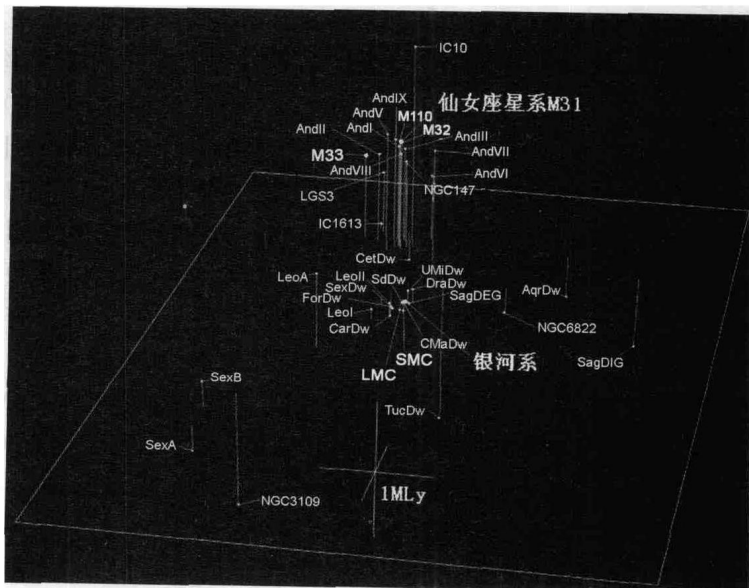



图5-21 本星系群中的主要星系分布示意图

银河系的卫星星系系统包括人马座矮椭球星系、大麦哲伦星系、小麦哲伦星系、大犬座矮星系、小熊座矮星系、天龙座矮星系、船底座矮星系、六分仪座矮星系、玉夫座矮星系、天炉座矮星系、狮子座 I、狮子座 II 以及杜鹃座矮星系。何者是银河系最邻近的星系？许多年来，大麦哲伦星系一直是天文学家认可的答案，但在 1994 年，这个头衔被人马座矮星系给夺走了。最近的测量显示，大犬座矮星系离银河中心只有 42 000 光年，距离只有人马座矮星系的四分之三，更只有大麦哲伦星系的四分之一。

仙女座星系的卫星星系系统包括 M32、M110、NGC 147、NGC 185、And I（仙女座）、And II（仙女座）、And III（仙女座）以及 And IV（仙女座）。M33 是本星系群中第三大的星系。它是否为仙女座星系的伴星系目前还没有定论。本星系群的其他成员的质量都远远小于这几个大的子群。本星系群的总质量估计为 6.5×10^{11} 个太阳质量。

在本星系群的不远处，还有很多星系集团，它们的成员数目比较多，如室女座星系团、后发座星系团、半人马座星系团、飞马座星系团等。目前已经确认的星系团有上万个。

星系团按形态大致可分为规则星系团和不规则星系团两类。规则星系团以后发座星系团为代表，大致具有球对称的外形，有点像恒星世界中的球状星团，所以又可以叫球状星系团。规则星系团往往有一个星系高度密集的中心区，团内常常包含有几千个成员星系，其中至少有 1 000 个的绝对星等亮于 –16 等。规则星系团内的成员星系全部或几乎全部都是椭圆星系或透镜星系。近来发现这种星系团往往又是 X 射线源。不规则星系团，又称疏散星系团，它们结构松散，没有一定的形状，也没有明显的中央星系集中区，例如室女座星系团。它们的数目比规则星系团更多。大的不规则星系团的成员星系数多达 2 500 个以上，小的只包含几十个甚至更少的成员星系，本星系群就属这一类。范围比较大的不规则星系团可以有几个凝聚中心，在团内形成一种次一级的成群结构。整个团就是这些较小群的松散集合体。不规则星系团总是各种类型星系的混合体，其中往往以暗星系占绝对优势，这也是与规则星系团的不同之处。就目前所知，只有少数不规则星系团发射 X 射线。

室女座星系团是离我们银河系最近的星系团，估计距离为 15 ~ 19Mpc。在天球上占据的天区面积为赤经 12h 到 13h，赤纬 +20°到 –20°。它包含 2 500 多个成员星系，包括旋涡星系、椭圆星系和不规则星系，其中旋涡星系占 2/3。但最亮的四个星系却是椭圆星系，著名的 M87（NGC4486）便是其中之一。M87 绝对星等约 –22 等，质量约 4×10^{12} 个太阳质量，这个星系是个强射电源和 X 射线源。

后发座星系团是离我们第二近的星系团，距离约为 113 ~ 138Mpc，属于富星

系团类型。它位于后发座中，离北银极只有 2°，角直径约 4°，分布呈球对称性。后发座星系团中央星系非常密集，中心区约有 1 000 多个亮星系，其中心附近有两个超巨星系，分别是 E 星系 NGC4889 和 S0 星系 NGC4874。该星系团成员可能有 1 万多个，大部分为椭圆星系或透镜星系。

二、超星系团

超星系团是由若干个星系团聚在一起形成的更高一级的天体系统。一个超星系团通常只包含几个星系团，质量 $10^{15} \sim 10^{17}$ 太阳质量。大多具有扁长的外形，其长径约 60 ~ 100 百万秒差距，长短径之比约为 4:1。宇宙中至少有 50 个超星系团。本星系群所在的超星系团称为本超星系团，较近的超星系团有武仙超星系团、北冕超星系团、巨蛇 - 室女超星系团等。

本超星系团或者叫做室女座超星系团的成员较多，包含约 100 个星系群与星系团，如本星系群、室女座星系团、大熊座星系云以及较小的星系群、星系云和星系团，其中心在室女座星系团附近，本星系群位于本超星系团的边缘并且仍在继续向远离室女座星系团的方向移动。本超星系团的范围为 30 ~ 75 百万秒差距。根据造成星系移动的引力效应，可以估计本超星系团的总质量大约是 10^{15} 太阳质量。

超星系团内部，星系团之间的引力作用比星系团内部星系之间的引力作用要弱得多，说明到这个尺度上，天体成团趋势已经明显减弱。所以，以前人们认为，宇宙在大尺度上是均匀的，表现为物质和运动分布在统计上的各向同性，不存在任何特殊的位置和方向。但是，现在人们已经观测到，在超星系团际的尺度上，宇宙空间的物质分布是不均匀的。例如，宇宙存在着所谓的“星系巨墙”，或称“星系长城”，这是宇宙中目前已知最大结构，类似一堵由连续不断的星系团和超星系团所组成的星墙。最近的巨墙离地球有 3 亿光年之远。巨墙彼此之间平均距离约 4 亿光年，其间便是星系极为稀疏的“巨洞”。人们最先在本超星系团中发现一个尺度达上亿光年的无星系空区。后又在英仙座超星系团中发现一个尺度为 1 亿光年的类似空区。此类大尺度的无星系空区即称“巨洞”。牧夫座的巨洞是迄今所知的最大巨洞，它大致呈球状，直径 3 亿多光年，其内部未发现正常的亮星系，估计那里的星系总密度约为正常情况下的 10%。星系巨墙同巨洞排列在一起，构成了宇宙大尺度结构的基本图像。不仅如此，研究还发现，在几千万秒差距范围内，似乎所有星系在受着一个“巨引源”或“巨吸引子”的控制而大尺度流动，有人称之为“南向天体流”，因为观测表明，本超星系团连同它近旁的 3 个超星系团，以每秒 700km 的高速向南飞去。这个巨引源的中心位于长蛇座与半人马座之间的方向，距离约为 43 百万秒差距，总质量达 $5 \times 10^{16} M_{\odot}$，相当于 50 万个银河系的质量。

三、总星系

比超星系团更高一级的天体系统称为总星系。总星系是目前人类已知的最高级的天体系统，包括所有可观测到的宇宙的全部。现代天文学观测所及的距离约为150亿至200亿光年，年龄也在150亿至200亿年。随着技术的不断进步，总星系的范围还有可能进一步扩大，人类对目前观测到的宇宙的认识也将越来越深刻。

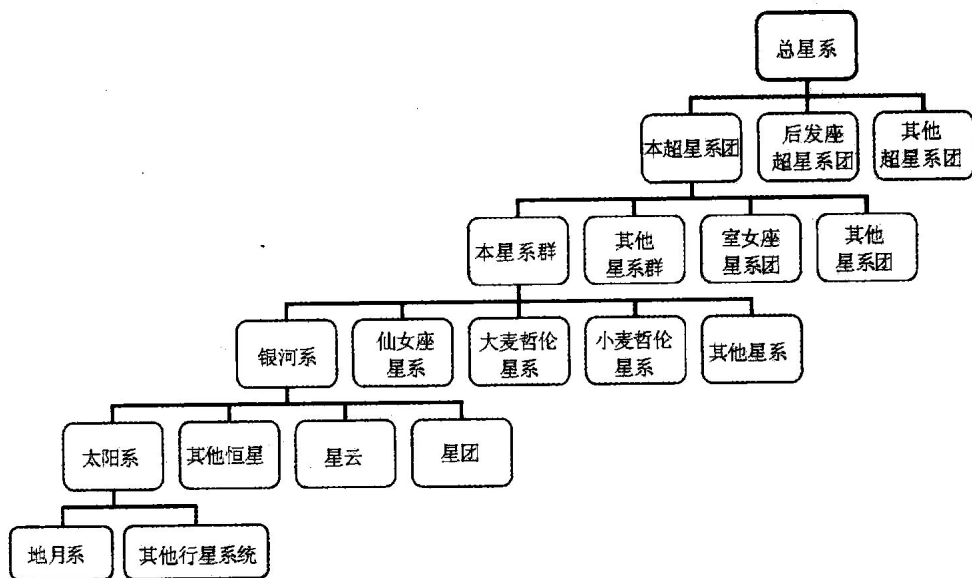



图5-22 不同等级的天体系统

图5-22显示了不同等级的天体系统及它们之间的层次关系。

思考与练习

1. 简述银河系的结构及太阳在银河系中的位置。
2. 银河系是如何运动的？
3. 简述银河系中有代表性的星团和星云。
4. 河外星系有哪些分类方法，具体方案是什么？
5. 活动星系有哪些类型？
6. 星系是如何形成和演化的？
7. 简述星系以上的四级天体系统。

第六章 膨胀的宇宙与地外文明探索

从渺小的地球到广袤的太阳系，从无垠的银河系到总星系，天文学引领人类跨过追求真理路上一个又一个阶梯，将极其宏大的宇宙一角展现在人类面前。现在，人类不仅可以用科学的思维了解宇宙的尺度和总体分层结构，还将追寻历史的踪迹，研究宇宙的起源与演化。同时，孤独的人类从来没有停止过在茫茫宇宙中找寻自己的同伴，探索地外文明的努力一直在继续着。

第一节 宇宙学

宇宙的含义有两种，一种是哲学的宇宙，另一种是自然科学的特别是天文学的宇宙。哲学宇宙概念所反映的是无限多样、永恒发展的物质世界；自然科学宇宙概念所涉及的则是人类在一定时代观测所及的最大天体系统。两种宇宙概念之间的关系是一般和个别的关系。随着自然科学宇宙概念的发展，人们将逐步深化和接近对无限宇宙的认识。宇宙学作为天文学的一个分支，是研究宇宙的大尺度结构、起源和演化的学科。现代宇宙学所研究的课题就是现今观测直接或间接所及的整个天区的大尺度特征，即大尺度时空的性质、物质运动的形态和规律，以及它们的起源和演化。

一、宇宙学史

人类在认识自然的一开始就在观察、思考宇宙的结构和起源问题。凡是人类文明发展较早的地区，都有关于宇宙的最起码的认识。最早出现的主要是远古时代关于宇宙的神话传说，可以称之为启蒙时期。随后在中国和西方又分别出现了众多关于宇宙的学说，这些学说都试图建立一个系统来更好地解释当时所观察到的宇宙。

1. 中国古代的宇宙说

中国古代关于宇宙的结构主要有三种学说：盖天说、浑天说和宣夜说。

盖天说。“盖天说”是我国古代最早的宇宙结构学说，源于西周时期。这一学说认为，天是圆形的，像一把张开的大伞覆盖在地上，地是方形的，像一个棋盘，

日月星辰则像爬虫一样过往天空，因此这一学说又被称为“天圆地方说”。“天圆地方”虽然符合当时人们粗浅的观察常识，但实际上却很难自圆其说。比如方形的地和圆形的天怎样连接起来，就是一个问题。于是，“天圆地方说”又修改为：天并不与地相接，而是像一把伞高悬在大地上空，中间有绳子缚住它的枢纽，四周还有八根柱子支撑着。到了战国末期，新的盖天说诞生了。“新盖天说”认为，天像覆盖着的斗笠，地像覆盖着的盘子，天和地并不相交，天地之间相距8万里。盘子的最高点便是北极。太阳围绕北极旋转，太阳落下并不是落到地下面，而是到了我们看不见的地方，就像一个人举着火把跑远了，我们就看不到了一样。新盖天说不仅在认识上比天圆地方说前进了一大步，而且对古代数学和天文学的发展产生了重要的影响。

为更加合理地解释日月星辰在天空中的运行问题，有人设计了一个“七衡六间图”，图中有7个同心圆，分为外衡、中衡、内衡，各个不同节令，太阳都沿不同的“衡”运动。七衡六间图收于汉代《周髀算经》，被称作第二盖天说。

浑天说。“浑天说”的基本思想萌芽于战国时期。完整的浑天说思想是由东汉时期著名的天文学家张衡提出的。“浑天说”认为，天和地的关系就像鸡蛋中蛋白和蛋黄的关系一样，地被天包在当中。“浑天说”中天的形状，不像盖天说所说的那样是半球形的，而是一个南北短、东西长的椭圆球。大地也是一个球，这个球浮在水上，回旋漂荡。

用“浑天说”来说明日月星辰的运行出没是相当简洁而自然的。浑天说认为，日月星辰都附着在天球上，白天，太阳升到我们面对的这边来，星星落到地球的背面去；到了夜晚，太阳落到地球背面去，星星升上来。如此周而复始，便有了星辰日月的出没。值得一提的是，“浑天说”把地球当作宇宙的中心，这一点与盛行于欧洲古代的“地心说”不谋而合。

“浑天说”所描述的宇宙结构更接近于真实，无论在天体测量还是宇宙理论方面都比盖天说前进了一步。因此浑天说成为我国自汉代以后1 000多年时间里占统治地位的宇宙学说。

宣夜说。“宣夜说”是我国历史上最有卓见的宇宙无限论思想。它最早出现于战国时期，到汉代则已明确提出。不论是中国古代的盖天说、浑天说，还是西方古代的地心说，乃至哥白尼的日心说，无不把天看作一个坚硬的球壳，星星都固定在这个球壳上。“宣夜说”否定这种看法，认为宇宙是无限的，宇宙中充满着气体，所有天体都在气体中漂浮运动。星辰日月的运动规律是由它们各自的特性所决定的，绝没有坚硬的天球或是什么本轮、均轮来束缚它们。“宣夜说”打破了固体天球的观念，这在古代众多的宇宙学说中是非常难得的。“宣夜说”不仅认为宇宙在空间上是无边无际的，而且还进一步提出宇宙在时间上也是无始无终的、无限

的思想。它在人类认识史上写下了光辉的一页。可惜,"宣夜说"的卓越思想,在中国古代没有受到重视,几至失传。

2. 西方的宇宙说

公元前 7 世纪,巴比伦人认为,天和地都是拱形的,大地被海洋所环绕,而其中央则是高山。古埃及人把宇宙想象成以天为盒盖、大地为盒底的大盒子,大地的中央则是尼罗河。古印度人想象圆盘形的大地负在几只大象上,而象则站在巨大的龟背上。公元前 7 世纪末,古希腊的泰勒斯认为,大地是浮在水面上的巨大圆盘,上面笼罩着拱形的天穹。

从公元前 6 世纪到公元 1 世纪,在古代希腊和罗马,关于宇宙的构造和本原有过许多学说。如毕达哥拉斯学派的中心火焰说(设想宇宙中心有一团大火焰);赫拉克利特的日心说;柏拉图的正多面体宇宙结构模型等等。进入中世纪,宇宙学沦入神学深渊,托勒密的地球中心学说占据正统地位,主宰宇宙学 1 000 多年。

16 世纪哥白尼建立日心说,推翻了地心说的统治地位,把宇宙学从神学中解放出来。布鲁诺更进一步认为太阳也不是宇宙的中心,宇宙是无限的,不存在任何中心。17 世纪,牛顿开辟了以力学方法研究宇宙学的途径,建立了经典宇宙学,他提出了万有引力定律,深刻揭示了行星绕太阳运动的力学原因,使日心说有了牢固的力学基础。在这以后,人们逐渐建立起了科学的太阳系概念。

18 世纪威廉·赫歇尔用取样统计的方法,用望远镜数出了天空中大量选定区域的星数以及亮星与暗星的比例,获得了一幅扁而平、轮廓参差、太阳居中的银河系结构图,从而奠定了银河系概念的基础。在此后一个半世纪中,H. 沙普利发现了太阳不在银河系中心、J·H. 奥尔特发现了银河系的自转和旋臂,以及许多人对银河系直径、厚度的测定,这样,科学的银河系概念最终确立。

20 世纪 E·P. 哈勃用造父视差法测得仙女座大星云的距离,确认了河外星系的存在。近半个世纪,人们通过对河外星系的研究,不仅已发现了星系团、超星系团等更高层次的天体系统,而且已使我们的视野扩展到远达 200 亿光年的宇宙深处。

纵观历史,不难发现随着时代的发展,作为宇宙学研究对象的天体系统,在深度和广度上不断扩展。古代自然哲学家所讨论的天文学的宇宙,不外乎大地和天空。哥白尼在《天体运行论》一书中说"太阳是宇宙的中心",意味着宇宙实质上就是太阳系。18 世纪天文学家引进"星系"一词,当时这个词在一定意义上说只不过是宇宙的同义语。20 世纪以来,天文观测的尺度大大扩展,达到上百亿年和上百亿光年的时空区域。

二、现代宇宙学

现代宇宙学包括密切联系的两个方面,即观测宇宙学和理论宇宙学。前者侧重于发现大尺度的观测特征，后者侧重于研究宇宙的运动学和动力学以及建立宇宙模型。

1. 宇宙大尺度特征

观测宇宙学已经发现,在目前观测所及的天区上,存在着一些大尺度的系统性特征,比如:河外天体谱线红移、微波背景辐射、星系的形态、氦丰度、天体时标等。

河外天体谱线红移。除了几个近距星系之外,河外天体谱线大都有红移,而且绝大多数是一致红移,即各种谱线的红移量是相等的。此外,在星系团尺度上,对于不同类型的星系,在各自的红移量与视星等之间、红移与星系角径之间存在着系统性的关系。它们反映着红移量与距离之间的规律。

微波背景辐射。来自宇宙空间背景上的各向同性的微波辐射,也称为宇宙背景辐射。微波背景辐射的最重要的特性是具有黑体辐射谱,黑体谱现象表明,微波背景辐射是极大的时空范围内的事件。因为只有通过辐射与物质之间的相互作用,才能形成黑体谱,而现今宇宙空间的物质密度极低,辐射与物质的互相作用极小,所以,我们今天观察到的黑体谱必定起源于很久以前。微波背景辐射应具有比遥远星系和射电源所能提供的更为古老的信息。微波背景辐射的另一特征是具有极高度的各向同性。这包含两个方面的含义:小尺度上的各向同性,在小到几十弧分的范围内,辐射强度的起伏小于 0.2% ~ 0.3%;大尺度上的各向同性,沿天球各个不同方向,辐射强度的涨落小于 0.3%。各向同性说明,在各个不同方向上,在各个相距非常遥远的天区之间,应该存在过相互联系。

星系的形态。河外星系的形态虽有多种,但绝大多数星系都可归纳为不多的几种类型,即椭圆星系、旋涡星系、棒旋星系、透镜星系和不规则星系。而且,各种类型星系的物理特征,弥散范围不算太大。

氦丰度。在宇宙中,氢和氦是最丰富的元素,二者丰度之和约占 99%。而且氢和氦的丰度比在许多不同的天体上均约为三比一左右。

天体时标。宇宙空间一些较老的球状星团年龄差不多在 90 亿 ~ 150 亿年之间。根据同位素考证,太阳系中某些重元素是在 50 亿 ~ 100 亿年前形成的。宇宙空间所有天体的年龄都小于 200 亿年。这就意味着我们观测所及的宇宙是有限的,应该在 200 亿年和 200 亿光年的时空范围内。

这些大尺度上的现象,反映出大尺度天体系统具有特别的性质。它的结构、运动和演化并非小尺度天体系统的简单延长。现代宇宙学正是以研究这一系列

大尺度上所固有的特征而与其他天文分支学科相区别的。

2. 宇宙模型

宇宙模型主要包括三方面的问题，即大尺度上天体系统的结构特征、运动形态和演化方式。按照大尺度特征变化与否来区分，有稳恒态宇宙模型和演化态模型。前者认为大尺度上的物质分布和物理性质不随时间变化；后者则认为随着时间的推移基本特征有明显变化。按照与温度有关的演化方式来区分，则有热模型和冷模型。前者主张温度是从高到低，后者主张温度是从低到高发展的。按照物质组成来区分，有"正"物质模型和"正－反"物质模型。前者主张宇宙全由"正"物质组成，后者主张由等量的"正"物质和"反"物质组成。

关于大尺度上天体系统的结构，也有两种不同的模型。一种是等级模型，另一种是均匀模型。等级模型认为在任何尺度上，物质分布都具有非均匀性，即天体分布是逐级成团的。后者则认为在大尺度上天体分布基本上是均匀且各向同性的，这种假定常常称为宇宙学原理，其基本含义是：第一，在宇宙尺度上，空间任一点和任一点的任一方向，在物理上是不可分辨的，即在密度、能量、压强、曲率、红移量等诸方面都是完全相同的。但同一点，在不同时刻，其各种物理量都可以不同，即允许存在宇宙演化。第二，从宇宙中任何一点进行观测，观察到的物理量和物理规律是完全相同的，没有任何一点是特殊的，地球上观察到的宇宙演化图景，在其他天体上也能观察到，宇宙处处是中心，又处处不是中心。大多数宇宙模型都遵从宇宙学原理，但也有少数宇宙模型不承认宇宙学原理，如等级模型。

三、膨胀的宇宙

人们对宇宙的认识，不论来自于哲学、数学还是天文观测，最终都以一种模型的形式呈现出来。下面简单介绍几种比较有影响的模型。

1. 牛顿静态宇宙模型

牛顿静态宇宙模型并不是指牛顿本人的宇宙学论述，而是泛指在牛顿经典力学体系架构下，对宇宙整体特性形成的观念。牛顿静态宇宙模型对时间和空间有两个基本认识：时间和空间是绝对的、相互独立的；时间和空间都是无限的。牛顿的绝对空间是一个与物质无关的存放物质的容器，它在上下、左右和前后各个方向上都是无限延伸的，在这个无限空间里到处都充满着天体。即使所有物质都没有，空间依然存在。而时间是所有事物共同依存而又不受任何事物影响的绝对存在，无始亦无终。即使所有物质发展过程都结束了，时间依然不断地流逝。绝对空间是静止不动的，绝对时间是永远流逝的；空间和时间都永无止境，不存在起源的问题。这就是牛顿静态宇宙模型的精髓。

牛顿静态宇宙模型很自然地被人们接受，因为它不需要回答诸如"宇宙如果

有界限,那么界限之外是什么?时间如果有起点,那么起点之前是怎样的?"这些无法回答的问题。然而认真追究起来,牛顿静态宇宙模型早就暴露出一些不能自圆其说的破绽。比如,当用万有引力定律讨论宇宙局部区域受力的情况时,总是假定在足够远处的天体产生的引力为零,但是在无限宇宙中,在任何足够远处周围都有无限多个天体,它们的引力合力不可能为零。

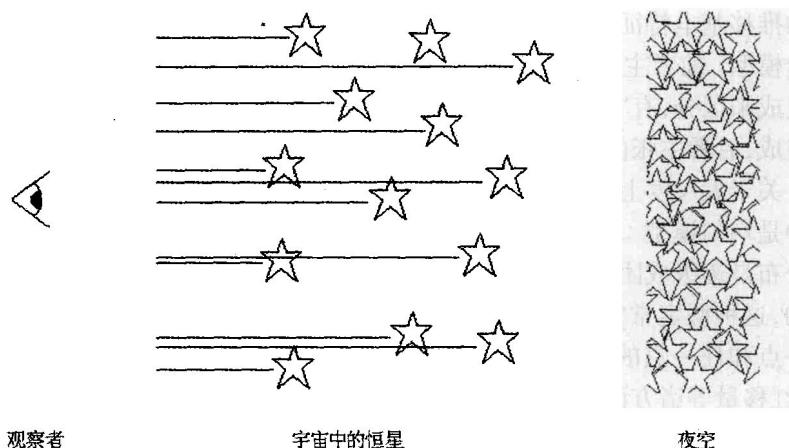



图 6-1 奥伯斯佯谬

牛顿静态宇宙模型面临的问题和挑战很多,其中,"奥伯斯佯谬"是非常著名的一个。奥伯斯佯谬又称夜黑佯谬,由德国天文学家奥伯斯于 1826 年提出。其确切的表述是:如果宇宙是稳恒,无限大,时空平直的,其中均匀分布着同样的发光体,由于发光体的照度与距离的平方成反比,而一定距离上球壳内的发光体数目和距离的平方成正比,这样就使得对全部发光体的照度的积分不收敛,黑夜的天空应当是无限亮的。这显然不符合真实情况,所以称之为"佯谬"。奥伯斯佯谬以牛顿静态宇宙模型为前提,推导过程明确无误,却得出了明显错误的结论,只能说明前提出了毛病。现在的解释是,奥伯斯佯谬论证说明宇宙是有限的,或最少是只有有限数量的星体。因为可观测宇宙是有限的,恒星存在的时间也是有限的,远处的星光最远亦只能传送至以其年龄为光年量度的有限距离,故此我们仍未能看见这些极远处的星光。

2. 爱因斯坦有限无界宇宙模型

爱因斯坦于 1915 年提出广义相对论后,1917 年用它来考察宇宙,建立了现代宇宙学中的第一个宇宙模型。这是一个有限无界的静态的宇宙模型,完善地解决了牛顿力学与无限无边宇宙结构之间不可克服的内在矛盾。在这个宇宙模型里,现实的三维空间是一个无界空间,无论向哪个方向运动都永远走不到尽头,不可能遇到边界;宇宙处处都具有同等地位,没有中心。但是,由于宇宙中到处充

满着物质，存在引力场，根据相对论，宇宙的三维空间是弯曲的。一个有曲率的三维空间只能是有限空间，因而宇宙是有限的。

一个气球和蚂蚁的比喻常用来帮助人们理解这个有限无界的宇宙：在气球的表面上画满了点。一只蚂蚁爬在气球表面上。对于蚂蚁来说它只能看到气球表面，它不能从气球表面向外看也不能想像气球的内部是什么样子。将气球充气，于是气球开始膨胀。蚂蚁看到气球表面每一个点都开始向外移动。不管蚂蚁在气球的什么位置，每个点都在向外移动。蚂蚁永远找不到宇宙的边缘。我们自己在宇宙中的情况就像这只气球上的蚂蚁一样，只不过是在三维空间里。

尽管爱因斯坦引力场方程的解暗示了宇宙要么在膨胀要么在收缩，爱因斯坦却坚持宇宙是静止的，为此他在引力场方程中加入了一个常数项——“宇宙常数”来使宇宙保持静止，它表现为一种斥力，以抵消引力，起到了“负”物质的作用。后来爱因斯坦对此感到非常后悔，把它称为“我一生中所犯的最大的错误”。

当爱因斯坦试图改进他的方程式的时候，苏联数学家弗里德曼发表了著名的论文《论空间的曲率》，求出了不含有宇宙常数的引力方程的通解，得到一个膨胀的有限无界宇宙模型。1927 年，比利时天体物理学家及神学家勒梅特得到的爱因斯坦方程的解和弗里德曼的结果类似。1929 年哈勃关系发表，宇宙膨胀终于为天文观测所证实。

3. 伽莫夫大爆炸宇宙模型

爱因斯坦的相对论导出尺度随时间膨胀的宇宙，哈勃发现了星系红移与它的距离成正比，建立了著名的哈勃定律。这两者是大爆炸宇宙模型的重要基础。大爆炸宇宙模型是美籍苏联核物理学家兼天体物理学家伽莫夫在 20 世纪中期提出来的。伽莫夫当时提出该模型时并未取名“大爆炸”，而是叫做 $\alpha-\beta-\gamma$ 宇宙创生理论。当时一些反对该理论模型的人给它起了一个含有嘲讽意味的名字叫做“大爆炸”，伽莫夫却欣然接受了这一名称，“大爆炸宇宙模型”从此有了特定的含义。

根据这一理论，伽莫夫在 1948 年预测了宇宙微波背景辐射的存在。但是当时的技术条件不可能去搜寻背景辐射是否存在，大爆炸理论一度被冷落。20 世纪 60 年代，这一辐射终于被探测到，有力地支持了大爆炸理论。大爆炸宇宙模型也因此在与另一个比较流行的稳恒态宇宙模型的竞争中占得了上风。

大爆炸理论的主要观点是认为我们的宇宙曾有一段从热到冷的演化史。在这个时期里，宇宙体系并不是静止的，而是在不断地膨胀，使物质密度从密到稀地演化。这一从热到冷、从密到稀的过程如同一次规模巨大的爆发。

大爆炸宇宙模型能统一地说明以下几个观测事实：①理论主张所有恒星都是在温度下降后产生的，因而任何天体的年龄都应比自温度下降至今天这一段

时间为短，即应小于200亿年。各种天体年龄的测量证明了这一点。②观测到河外天体有系统性的谱线红移，而且红移与距离大体成正比。如果用多普勒效应来解释，那么红移就是宇宙膨胀的反映。③在各种不同天体上，氦丰度相当大，而且大都是30%。用恒星核反应机制不足以说明为什么有如此多的氦。而根据大爆炸理论，早期温度很高，产生氦的效率也很高，则可以说明这一事实。④根据宇宙膨胀速度以及氦丰度等，可以具体计算宇宙每一历史时期的温度。伽莫夫曾预言，今天的宇宙已经很冷，只有绝对温度几度。1965年，果然在微波波段上探测到微波背景辐射，温度约为3K。

4. 恒稳态宇宙模型

伽莫夫的大爆炸宇宙模型一度被冷落后，英国天文学家邦迪、霍伊尔和戈尔德于1948年提出了恒稳态宇宙模型，试图调和牛顿静态宇宙模型和宇宙膨胀之间的矛盾。他们把宇宙学原理推广到包括沿时间不变的概念，即完美宇宙学原理。根据这个原理，至少在最大的尺度上宇宙是永恒不变的。于是，从空间和时间中的任何一点看去，宇宙都呈现出相似的面貌。这个模型的要点是，在宇宙膨胀的过程中，物质不断地以准确的速率产生出来，恰好填补了因宇宙膨胀而出现的密度减小趋势，维持宇宙中各处相同的平均物质密度。

恒稳态宇宙模型与质量守恒、能量守恒等一系列基本物理定律相违背，许多的观测事实也不支持这一模型，所以很快就不被人们所接受了。

5. 标准大爆炸宇宙模型与暴胀模型

现在我们在一般情况下提到的大爆炸宇宙模型，指的是在伽莫夫模型的基础上经20世纪70至80年代重新审视与充实提高的宇宙模型。这一模型之所以成功，是因为它建筑在近代粒子物理学坚实的基础之上，而且与天文观测相一致，是最简单而又最自然的宇宙模型。其最令人惊奇之处在于，“从宇宙创生后万分之一秒，直到后来的3分钟，宇宙的行为已经被非常仔细地算出……而这种计算是完全符合现代物理理论的。”

每一种理论都要经过实践的检验并不断完善，大爆炸理论也不例外。尽管大爆炸理论已经成为一种广为认可的宇宙演化理论，它面临的难题还有很多，比如奇点问题、视界疑难、平直性疑难和磁单极疑难等。为解决大爆炸理论在宇宙极早期的诸多疑难，美国粒子物理学家古斯于1981年提出一种极早期宇宙演化的模型，即暴胀模型。其核心要点是认为，宇宙创生10^{-35}秒至10^{-33}秒之间，宇宙以大大高于正常的速度急速膨胀。暴胀使宇宙在极短的10^{-32}秒时间内扩大了10^{43}倍！今天所观测到的宇宙只是来自暴胀前一个均匀区域内的一小部分。

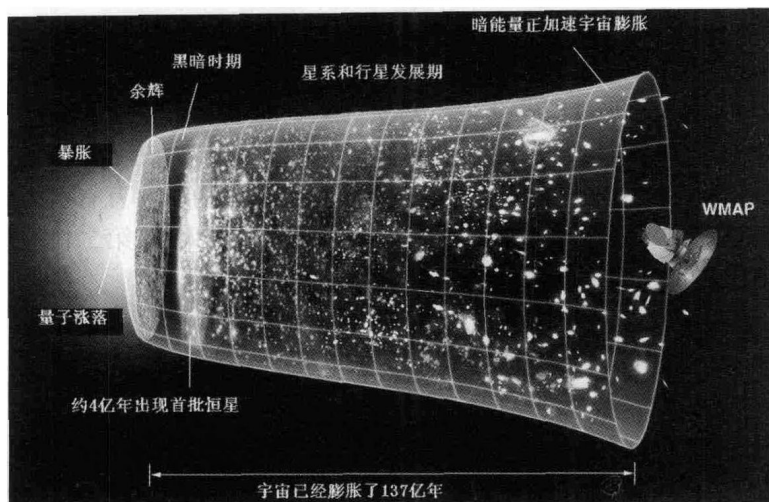



图 6-2 基于 WMAP(威尔金森微波各向异性探测器)数据的宇宙大爆炸图像

包括暴胀过程在内的大爆炸的整个过程是：①宇宙历史的 10^{-44} 秒以前，时间和空间都小于量子化的普朗克尺度[①]，时空还没有独立形成，称为普朗克时代。②从 10^{-44} 秒开始，引力被分离出来，而强作用力、电磁力、弱作用力统一在一起，称为"大统一"时代。③在 10^{-36} 秒时，强作用产生，但弱作用与电磁作用仍然统一在一起，重子和反重子数失衡，宇宙出现不对称性。④在 10^{-10} 秒时，弱作用同电磁作用分离，宇宙出现了更多的不对称性。⑤$10^{-4}$ 秒时，温度超过 10 万亿开，大于强子的阈温，光子碰撞产生粒子的反应与粒子湮灭产生光子的反应处于平衡状态。宇宙中的粒子形式有正、反夸克，正、反电子，正、反中微子。此间正反粒子相互湮灭后只有 10 亿分之一的正粒子留存下来。⑥$10^{-2}$ 秒时，温度 1 000 亿开，光子产生强子的反应停止，但光子与轻子的可逆反应仍在进行，并处于平衡状态，轻子和强子的数量比为 10 亿比 1，强子中质子和中子各占一半。⑦13.82 秒时，温度 30 亿开，轻子时代结束。由于中子衰变为质子，质子与中子的数量比为 83:17。⑧3 分 46 秒时，温度 9 亿开，所有能量转化为物质的反应都已停止，物质已经全部产生出来。质子与中子的数量比为 87:13，而全部的中子都与等量的质子结合为氦核，不再衰变，剩余的质子单独成为氢核，故氢核与氦核的质量比为(87−13):(13+13)＝74:26，这两个比例数一直保持到现在。⑨40 万年时，温度 3 000K，在此之前宇宙中各种物质粒子大体均匀地分布在空间，没有复杂的结构，主要是由高温的辐射(光子)充满着，粒子悬浮于辐射之中，辐射与物质处

① 普朗克尺度：根据量子力学的测不准原理，一些基本量度如长度和时间具有测不准性。普朗克长度为 10^{-33}cm，比普朗克长度更短的长度是没有意义的。普朗克时间为 10^{-43}s，没有比这更短的时间存在。

于热平衡状态；在此之后温度继续降低，原子核与电子结合形成原子，自由电子消失，辐射和物质不再处于热平衡之中，光子可以自由穿行，宇宙变得相对辐射透明，从以辐射为主的时期转变为以物质为主的时期，称为“复合时代”。⑩150亿年时，温度2.7K，在这之前宇宙经过漫长的膨胀降温过程，辐射压力越来越小，直到再也阻止不了星系级乃至恒星级质量的成团物质在万有引力作用下凝聚压缩，星系和恒星终于形成了。然后很多第一代恒星灭亡，第二代恒星开始产生，行星上发展出生命，乃至人类。

第二节　地外文明探索

当仰望苍天的时候，我们的自然总会发问：我们是谁？我们从哪里来？我们是否孤独？茫茫宇宙间有没有我们人类的同类？著名哲学家罗素曾经说过，对于这样一个问题，无非两种答案，一个是“是”，一个是“否”。其实不管是哪一种答案，我们都会感到无比的惊奇，真正的问题在于，谁也不能给出一个确定的答案。目前我们只能说，地球是迄今为止人类所知的宇宙中唯一有生命和文明存在的星球。

一、地外文明存在的可能性

地外文明存在的必然前提是存在地外生命。现在，人们对存在地外生命抱乐观态度，并且一些地球上的实验证据和天文学的观测证据正在不断地积累中。而对于存在地外文明的现实可能性依然有怀疑，更多地是从哲学层次上去相信有地外文明的存在，尚缺乏哪怕是最间接的科学证据。

1. 地外生命存在的科学依据

这个问题的前提是另一个问题，即生命的存在形式问题。要讨论宇宙中到底有没有外星生命，首先要有个生命的定义，既然到现在为止还没发现另一种形式的生命，我们只能按地球上的生命形式来定义，否则就像在讨论有没有鬼神一样。承认宇宙的物质性及其规律的统一性是一切自然科学研究的前提。天文学研究已经证实，在地球以外的广阔宇宙中，构成恒星、星系、星际物质的基本材料是一致的，所有物质之间相互作用的物理、化学过程及所遵循的规律，所有物质、能量、信息交换的机理和方式，都是一致的。否认这个前提，问题就无法讨论了。

地球是生命的摇篮，地球之外的太阳系中，到现在为止还没发现任何形式的生命存在。于是，地球的环境成为寻找地外生命的一个标准。从现在所知道的情况看，地球确实是个得天独厚的地方。从大环境来说，太阳系处于一个恒星很稀疏的地方，否则强大的高能辐射将会杀灭一切任何形式的生命。从中等环境来

看,太阳和地球不大不小,距离不远不近,刚好适合生命的发生和繁衍。离地球最近的行星物质刚好都聚集成了大行星,在距地球不太远的地方又有土星和木星这样的特大行星吸引了天外飞来的彗星。如果小行星带处于火星或金星的位置上或者没有土星和木星将会大大增加大陨星撞击地球的几率,对地球上的生命会大大的不利。从小环境看,地球不大不小,太小就无法保持大气层和水,太大大气压力又太高,自身引力太大又会造成高大的植物和动物无法生存。地球上的化学元素组成恰到好处,首先大气中主要成分是氧和氮,比例也恰好。氧太少生命无法生成,太多了氧化反应太快会使任何能氧化的东西都氧化也无法生成生命,就是形成生命在同样的大气压下也会氧中毒。而冲淡氧气的又刚好是氮气,氮气是一种不活泼的气体而又是形成蛋白质不可缺少的元素。地球上又有适当数量的氢,能形成足够的水再剩下一些用于形成蛋白质。地球上又有足够的铁和碳,碳是形成生命不可缺少的元素,铁对形成地球上大部分的生命是不可缺少的。另外地球自转的偏角也使地球上大部分地区能适合生命的生存,否则地球上能生存生命的区域将大大缩小。

要想寻找到一个类似地球这样独特环境的星球实在不是一件容易的事,但是,地外生命存在的可能性,正在被越来越多的人们所接受。人们认为地外生命存在的原因有三:一是宇宙中适于生命生存的区域数量很大;二是在地球和太阳系中找到的元素,如 C、H、O、N 等构成生命的基本元素同样遍布宇宙;三是有机化合反应在许多环境条件下都能进行,特别是地球上的实验室里已经证实了简单有机分子可以合成氨基酸并进一步合成有生物活性的蛋白质,而科学家们早在 20 世纪 60 年代就已经在暗黑星际云中发现了普通有机分子,这更加支持了存在地外生命的判断。

2. 地外文明产生的条件

地外文明是否存在?支持者们是这样思考这个问题的:银河系中有大约 2 000 亿颗恒星,宇宙中有 1 000 亿个银河系这样的星系,因此宇宙中恒星数目大约是 10^{23} 个,这是一个极其庞大的数字,即使文明产生是一种概率极其微小偶然事件,也是有可能发生的。当然他们也承认类地文明的产生需要极为苛刻的条件,为此他们做了仔细的筛选,以下就是他们的逻辑。

生命的进化是一个极其缓慢的过程,其进程之慢完全可以同恒星演化的时间尺度相比。一种称为蓝－绿藻类的比较高级的单细胞生物早在 35 亿年前就已经出现了,人类这种智慧生命是在太阳形成后经过 45 亿至 50 亿年漫长时间出现的。因此,年轻的恒星,即使它周围存在行星,也不可能存在较高级的生命形式。另外,大质量恒星的发光发热寿命只有几百万年,对于生命进化所需要的时间来说也是远远不够的。只有类似太阳或更小一些的恒星才是合适的候选者,在

我们的银河系中符合这一条件的恒星约有 1 000 亿颗。

并非所有恒星在形成时都会伴随有一个行星系统。在银河系内,双星约占恒星总数的一半。有一种观点认为,对于双星系统来说,即使已有行星形成,那也不要多久,这些行星不是落到其中一颗恒星上,就是会被抛入星际空间而远离双星系统。于是,只有单星才是可能的第二轮候选者。如果乐观地假定所有单星都拥有数量不等的行星,那么,银河系内大约可以有 400 亿颗带有行星的恒星。

生命不可能在任何一颗行星上诞生, 行星离开恒星的距离必须恰到好处。同时特别假定液态水的存在是生命存在的前提,那么,这两个条件是十分苛刻的。如果地球离开太阳的距离比现在靠近百分之五,生命就不可能存在;再远百分之一,地球会彻底冻结。恒星周围具有能维持生命所必需的气象条件的行星是极为罕见的。计算表明, 能满足这一条件的第三轮候选者充其量也只有 100 万颗恒星。

100 万虽然还是一个不小的数目, 但只有能同他们进行某种形式的接触才能最后证实地外生命的存在。目前地球上最强有力的联系手段当推无线电通讯。毫无疑问,不要说几十亿年前的蓝藻,就是人类本身,在几百年前也还没有能力发播无线电讯号。这 100 万当中能有多少能达到至少人类所处的科技水平呢?以地球为例,地球诞生后大部分时间一直在抚育着生命,但只有很短一部分时间生命才具有高级生物的形式。如果再次乐观地假定,有高度文明的外星人在和平繁荣的环境中生活了 100 万年,科学技术十分发达,财力充足,有能力不停止地向空间发送强大的无线电讯号。那么,进化成智慧生命需要 40 亿年,100 万年只占其中的万分之二点五。因此,100 万个第三轮候选者中能做到这一点的就只有 250 颗了。

从 2000 亿到 250,支持者们已经做了令人敬佩的巨大让步,然而严谨的人会发现,这其中的每一步筛选都非常不确定且主观性极大,因而最后得出的数字也是毫无说服力的。比如上述高度文明的外星人,如果其文明平均只存在 4 000 年就因战争终止,那么最后的数字就不是 250 而是 1。这种参数的不确定在另一个著名的"绿岸公式"中也表现得很明显。

1961 年,美国天文学家德雷史提出了一个公式来估计银河系中究竟有多少拥有文明社会的星球,其表达式为:

$$N = R_S \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_c \times L$$

式中 N 是银河系可能有的文明总数;R_S 是银河系中合适恒星的诞生率;f_P 是合适恒星带有行星的系数;n_E 是有生物圈的行星数;f_L 是能产生生命的行星的比例系数;f_I 是能发展为智慧生命的比例系数;f_c 是智慧生命有通信能力和文明的比例系数,L 是与外界通信能力的持续寿命(即文明存在时间)。据研究,可取以

下数据作计算：R_S=5～10 颗恒星 / 年，f_P=0.5，n_E=2，f_L=0.1～1，f_I=0.1～1，f_c=0.1～1；由此得：N=(0.005～10)L。L 取决于该星球上的文明持续能力——是长期存在还是由于核战争之类原因自我毁灭。如取 L=(10^4～10^5)年，则可算出两套数据：差的情况 N=50～5 000 个，好的情况 N=10^5～10^6 个。

我们知道，在无限的情况下，极小概率的事件必定会发生，但在有限的情况下就不一定了，即使这个有限是前面提到的 10^{23} 这么庞大的数字。从哲学意义上说，宇宙的无限注定了天体数量的无限，从而必然存在有地外文明的星球。即便我们相信，在宇宙中生命甚至智慧生命绝不只是地球独有的现象——虽然是罕见的，我们并不孤单。其实问题只有一个，就是发现它们的难度太大。

二、地外文明探索的艰巨性

目前，探索地外文明的方法主要有 4 大类：①接收并分析来自太空的各种可能的电波。②人类用无线电主动向外太空发出表明人类在太阳系内存在的信号。③发射探测器到别的恒星系统。④寻找别的行星系统，这是一种间接但很关键的方法。

宇宙中的文明（包括人类文明）可分为 3 种类型。I 型文明只能控制本星球，能够利用本星球的矿藏能源，在本星球种植、生产和居住，人类文明就属于 I 型文明。II 型文明能掌握所在中央恒星和行星系统的物质和能量资源。III 型文明能掌握整个星系的一切资源。II 型和 III 型称为超级文明。

以人类文明目前的能力，方法①是在能力之内的，也是最经济的，但是完全被动，寄希望于地外文明的高度发达；方法②主动性强，但是难度非常大；方法③实际上超出了能力之外，在可预见的未来是不可行的；方法④则是巧妙而且很有希望的。

地外文明探索的艰巨性突出表现为空间隔离。恒星之间的距离实在是太遥远了。以人类目前实际能力所能给予的最高宇宙航行速度——第三宇宙速度（地球轨道附近 16.7km/s）计算，18 000 年才能飞行 1 光年，到达最近的恒星，至少也需要七八万年时间。如是载人航行，人的工作寿命以 50 年计算，则需要 1 000 多代人的生命接力才能达到此次宇宙航行的目的。显然，人类直接乘宇宙飞船到宇宙空间去探索地外文明几乎是不可能的。

利用无线电通信的手段也受制于空间隔离。理论上讲，在自由空间无线电波的传播损耗（扩散衰减）大小与传播距离的平方及使用频率的平方成正比关系。星际间并不是绝对的真空，还有宇宙尘埃和气体。在传播介质中，无线电波的传播特性不仅有扩散衰减，还有介质的折射和吸收造成的衰减。因此，要有效使用无线电技术进行远距通信，就必须有强大的发射功率和巨大的天线，如世界上最

大的阿雷西博射电望远镜，发射功率为150kW，抛物面天线直径366m。但这远不能满足星际有效通信的需要。据估计，要在1万光年距离内用21cm波进行有效通信，发射功率应达2×10^{15}kW，球形天线直径达1万千米，质量达5×10^{19}t，这个质量是地球质量的1/120，这些材料哪里来？还有，如果这种发射功率所需能量由核能产生，则每年所需核燃料1亿吨，这个来源也是问题。当然，如果使用定向发射，就可以用相对很小的功率，在相对很长的距离内进行有效通信。但是这又会产生另外一个问题：定向发射只能覆盖很小面积的天区，其他天区基本上接受不到有效信号，而用这种方式寻找地外文明，需要很长时间来扫描整个天区，工作量极大。

三、太阳系内的地外生命探索

太阳系中基本上已经不太可能有地球之外的文明，但是人们并没有停止对太阳系内的地外生命的探索，因为地外生命一旦被发现，将会使人类对地外文明有着更深刻的理解，同时还能指导人类寻找到地球生命的第二居住场所。目前并没有找到生命的存在，但天文学家并没有放弃，继续以寻找行星和它们的卫星有没有生命赖以生存的水为中心的探索。

1. 彗星和陨星

有一种理论认为，地球上的生命的先驱是由彗星带来的，甚至地球上的大部分水也是早期由彗星带来的。有科学家估计，大约在40亿年前，地球和月球经常受到彗星和陨石的袭击。在地球生命开始的第一个10亿年里，可能有10万多个彗星撞到地球上，带来了大量的彗星上的有机物。

1986年哈雷彗星回归的时候，苏联和欧洲的两艘宇宙飞船飞近哈雷彗星，探测到彗星的冰层中含有有机化合物。在地面上，科学家对一块1838年降落在南非的陨石做了分析，发现陨石中含有氨基酸、核酸盐和碳氢化合物。1969年降落的一块陨石中被检测到多种氨基酸成份，甚至还包括一些地球上所没有的。

2. 月　球

月球是除地球之外我们人类唯一亲临过的星球。1998年美国发射了“月球勘探者”绕月极轨卫星，在月面100km上空对月球两极及整个月面进行了详细考察，明确了月球南、北两极存在大量水冰。水冰的存在，并不能说明月球上有生命存在，但它至少改变了人们心目中月球上滴水全无、一片荒漠的印象。

3. 金　星

人类对太阳系行星的空间探测首先是从金星开始的，苏联和美国从20世纪60年代起，就对揭开金星的秘密倾注了极大的热情。迄今为止，发往金星或路过金星的各种探测器已经超过40个，包括迄今最先进最为成功的金星探测器“麦

哲伦"号,以及欧洲航天局2005发射的"金星快车"探测器。

这些探测器获得了大量有关金星的科学资料。结果表明,金星大气主要以二氧化碳为主,表面温度高达280℃~540℃,大气压力高于地球大气压90倍。显然,这样的自然环境,类地球生物体是无法存在的,对金星的考察也证实金星上没有生命。

4. 火 星

火星对于人类有一种特殊的吸引力,因为它是太阳系中最近似地球的天体之一。火星赤道平面与公转轨道平面的交角非常接近于地球,这使它也有类似地球的四季交替,同时,火星的自转周期为24小时37分,这使火星上的一天几乎和地球上的一样长。

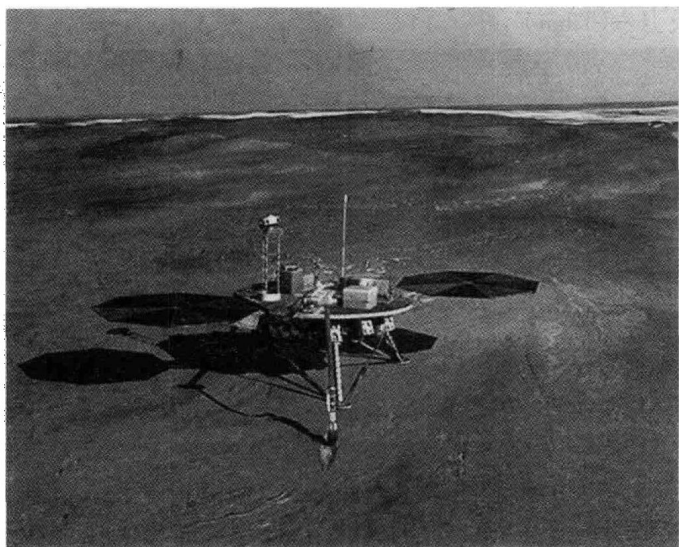



图6-3 "凤凰"号火星探测器假想图

到目前为止,火星是除了地球以外人类了解最多的行星,已经有超过30枚探测器到达过火星,它们对火星进行了详细的考察,并向地球发回了大量数据。同时火星探测也充满了坎坷,大约三分之二的探测器,特别是早期发射的探测器,都没有能够成功完成它们的使命。在所有火星探测器中,美国发射的"水手"9号、"海盗"1号和2号、火星环球探测者等都是较为成功的。进入到21世纪,人们对火星探测的兴趣不减。2001年美国发射了"奥德赛"号探测器,2003年6月欧洲宇航局的"火星快车"、携带"勇气"号火星车的美国"火星探测流浪者"号探测器发射升空,同年7月,美国"勇气"号的孪生兄弟"机遇"号火星车发射升空。2007年美国发射"凤凰"号火星着陆探测器,已于2008年5月25日成功降落在火星北极附近区域。我国也计划于2009年发射火星探测器。

这些火星探测计划的目的就是找出火星上有水存在的证据。而现在我们知道,火星在历史上是有过水的,因为在火星上发现了只能在有水情况下才会形成的地貌和矿物。2002年,美国"奥德赛"号探测器在火星北纬65度以北发现大范围冻水层存在的证据,冻水层位于火星表面之下大概半米。2004年,欧洲"火星快车"探测器发现火星南极存在冰冻水。这是人类首次直接在火星表面发现水。

虽然目前还没有在火星上找到生命存在的任何迹象,但是,只要有水,火星仍是地外生命最有可能的据点。鉴于火星上冰冻水的发现,相信今后一段时期将是火星探测的又一轮高峰,也许成功就在不远的明天。

5. 木卫二和土卫六

在太阳系各行星的卫星中,科学家们认为存在生命可能性较大的是木卫二(Europa)和土卫六(Titan)。

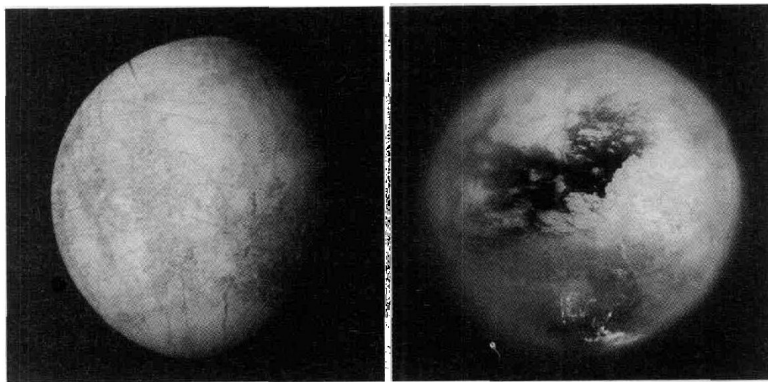



图6-4 木卫二(左)和土卫六(右)

1989年美国发射的伽利略木星探测器,于1995年到达木星附近,1996年3月转入环绕木星的轨道,成为木星的人造卫星,对木星及其卫星进行了详细地考察,直至1997年12月结束。这次考察未发现生命的迹象,但是发现木卫二表面覆盖着白色冰壳,冰壳上布满了陨石撞击坑和纵横交错的条纹,在冰层之下可能存在液态水。

2004年12月25日,"惠更斯"号探测器脱离了位于环土星轨道的母船"卡西尼"号,飞向土卫六,并于2005年1月14日登陆土卫六。土卫六是与原始地球条件很相似的一个星球。它是太阳系中第二大卫星,仅次于木卫三,质量是月球的1.8倍。它有厚厚的大气层,其中95%由氮气组成,剩下的气体则是甲烷和其他碳氢化合物,这些大气和早期的地球十分相似。

四、太阳系外的地外文明探索

这是最为困难的一个领域,充满了等待和无奈。等待外星人主动出现或发

出信号，无奈自己不能走出太阳系外。但是人类已经迈出了第一步，并不懈地努力着。

1. 宇宙通讯

当代射电天文学的技术能力，包括灵敏度、分辨率及数据采集、分析能力都已达到了可以与较近的地外文明通讯的程度。如果地外文明的信号发射功率为1 000兆瓦，用世界上最大的366m射电望远镜天线可以接收到18光年以内的信号，在定向发射的情况下，还可以大幅度降低对发射机功率的要求。

国际宇航科学院专门设立了一个SETI（search for extraterrestrial intelligence，搜寻地外智慧生命）委员会。SETI科学的第一块里程碑，是美国康奈尔大学的天文学家吉塞皮·莫里森于1959年在著名科学杂志《自然》上发表的一篇文章，题为“探索星际通信”，文中提出利用现有设备，在1 420MHz率附近搜寻地外文明的建议，得到了强烈反映。该文论述了星际无线电通讯的可能性，宇宙空间中存在着大量的氢(H)原子，中性氢会发出波长为21cm的无线电辐射，这是大自然给出的一种标准波长，频率为1 420MHz，这个短波频率在行星大气中反射和吸收都很小，传播距离远，信号的客观性不亚于几何图形，具有发达科技的星球文明应该都有高度灵敏的接受21cm波长的接收器，所以，向宇宙发射波长为21cm的无线电波，再采用大规模的射电望远镜收集信号似乎也是一种可行的办法。此后，SETI研究工作便从理论和实践两方面逐渐展开了。

1960年，美国国家射电天文台(NRAO)对地外无线电信号作了首次搜索。当时，用于搜索信号的是一架26m的射电望远镜，它有一台单通道的射电接收机，所用的频率接近于氢原子的发射频率(21cm波段)。这项计划称为“奥兹玛计划”(OZMA，一部童话故事中的公主，她住在十分遥远的名叫奥兹的地方)，探测目标是鲸鱼座τ星(天仓五)和波江座ε星(天苑四)，这是两颗类似太阳的单星，距离都是11光年左右，共监测了200小时。结果没有发现外星信号，倒是收到了人类自己的干扰信号。第二期奥兹玛计划改用两台口径更大的射电望远镜，仍在21cm波段上，对660颗离我们较近的类太阳恒星进行监测，也没有得到结果。

1972年美国宇航局(NASA)的一个小组提出了“赛克洛普斯计划”(Cyclops，希腊神话中的独眼巨人)，用分布在几十千米范围内的1 026面口径100m的天线，在18cm到21cm波长范围内观测1 000光年以内的信号。可惜的是，这个射电天文历史上最伟大的计划，因巨额的经费预算未能得到美国政府的资助而搁置起来。

1992年，NASA开始执行一项计划，叫做“高分辨率微波巡视”(HRMS)，使用世界上最大的射电望远镜，即美国阿雷西博射电天文台的直径为366m的射电望远镜，对100光年以内的800～1 000颗类太阳恒星逐个进行扫描，使用每秒

钟 10 亿次以上的专用计算机，每秒钟巡查 1 000 万个频道，接收机同时对 200 万个带宽为 20Hz 的频道进行分析，结果还是一无所获。

1993 年，SETI 研究所在民间资助下启动了名为"凤凰(Phoenix)"的计划，它是迄今为止 SETI 行动中最灵敏、最全面的计划。它有选择地细查了 200 光年以内约 1 000 个邻近的类日恒星——我们自然地假想这些恒星周围有可供生命生存的行星。到 1999 年，凤凰计划已观测了它名单上一半的星体，但仍未检测到地外文明信息。2004 年凤凰计划结束，一共搜索了约 750 颗星球，没能发现外星人的信号。

2007 年 10 月，美国艾伦望远镜阵列(ATA)项目第一阶段——42 个碟形天线投入运作。ATA 是加利福尼亚大学伯克利分校射电天文台和 SETI 研究所的共同项目，坐落于加州哈特克里克天文台。全部建成后，阵列由 350 个直径达 6m 的碟形天线组成，其主要作用之一就是搜寻外星智慧生命发出的无线电信号。ATA 能够捕捉到距地球 500 光年远处发出的无线电信号，其接收距离是目前全球最大的射电望远镜——阿雷西博射电望远镜传送距离的数倍。

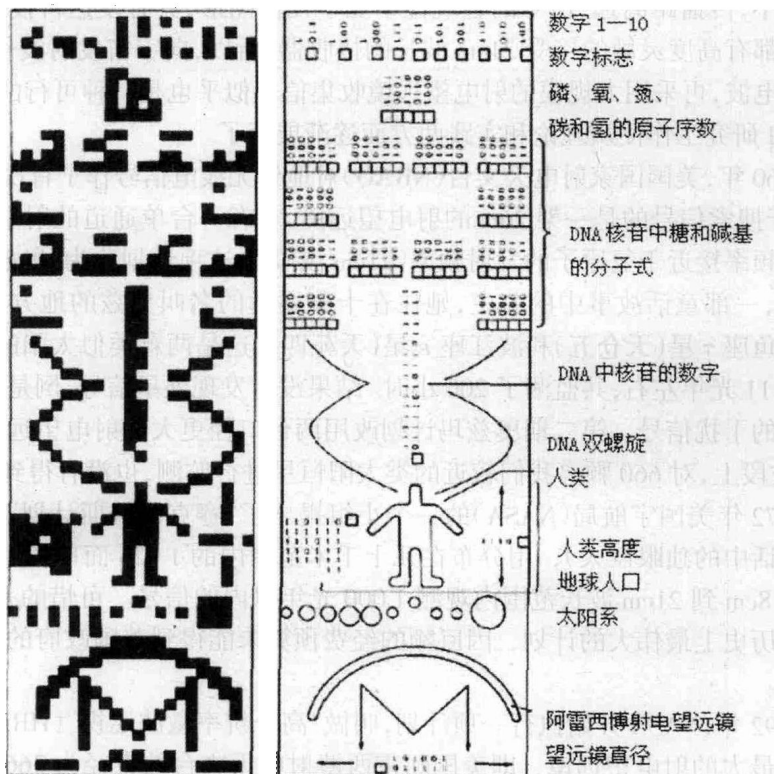



图 6-5 阿雷西博望远镜朝 M13 方向发送的信息解码

不仅被动地接受外星人的“电报”，人类还曾尝试向外星人主动发送“电报”。1974 年 11 月 16 日，美国科学家在波多黎各阿雷西博天文台，向银河系中的武仙座球状星团 M13 发出了电报。该电报大约将于 2.5 万年后抵达此星团的 30 万颗恒星。图 6-5 所示是由阿雷西博望远镜发出的一份信息及其译解。它是用“水坑”中的一个频率(2 380MHz)发出的，发送速度是每秒钟十个字符。这份信息中字符的总数是 1 679，所以发送时间仅约 3 分钟。该信息由在一个或两个频率上的一系列发射组成，一个频率代表图中呈白色的印刷符号，另一个频率则指示图中呈黑色的特号。于是，即使只用这么少量的符号，也已经能够用某种数字系统来描述某些相当复杂的化学物质(包括地球生命的最重要的分子结构)。该系统有可能表明这种分子是多么复杂，从而隐喻着我们的进化水平，甚至对我们的智慧水平也能有所暗示。最后，有些图形信息提供了有关人类解剖学、太阳系排列以及有关我们的技术水平的信息。

2. 发射探测器

迄今为止，业已从地球发出的最长的信息是“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”宇宙飞船携带的唱片记录的一系列形象。每份记录包括很多种地球上的音乐、代表性的声音、用各种语言说的问候话，还有 116 幅详细说明地球、太阳系，特别是人类文化的种种重要特征的图画。这一系列图象中的字符总数约达 1 亿个。这么多的字符可以非常详细地描绘地球上的文化。

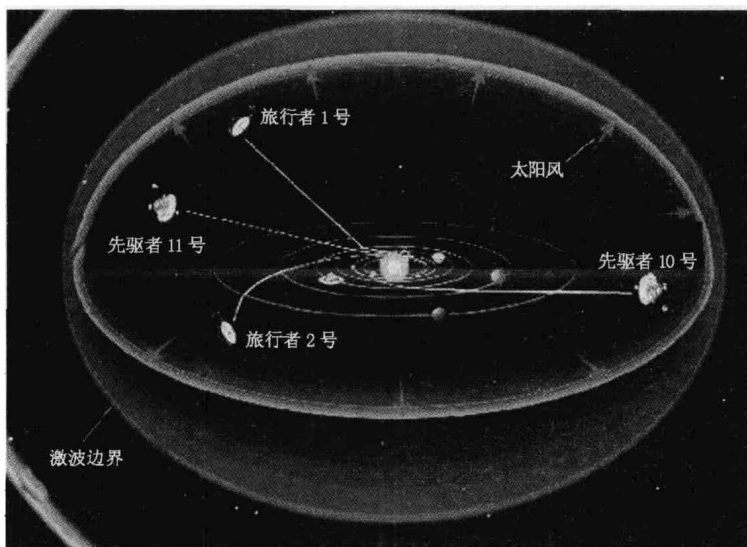



图 6-6 “先驱者”10 号、11 号和“旅行者”1 号、2 号位置示意图

“旅行者”1 号和 2 号是 1977 年美国发射的，在这之前的 1972 年和 1973 年美国发射了“先驱者”10 号和 11 号，它们都在完成对太阳系内的探测任务后，带

着许多人类的信息，作为人类使者，漫游在恒星际空间(图 6–6)。“先驱者”10 号和 11 号两艘宇宙飞船上携带的是另一种信息——“地球名片”：在 6×9 英寸的镀金铝板上标明地球与太阳在银河系中的位置、太阳系的结构、地球人外貌等信息(图 6–7)。

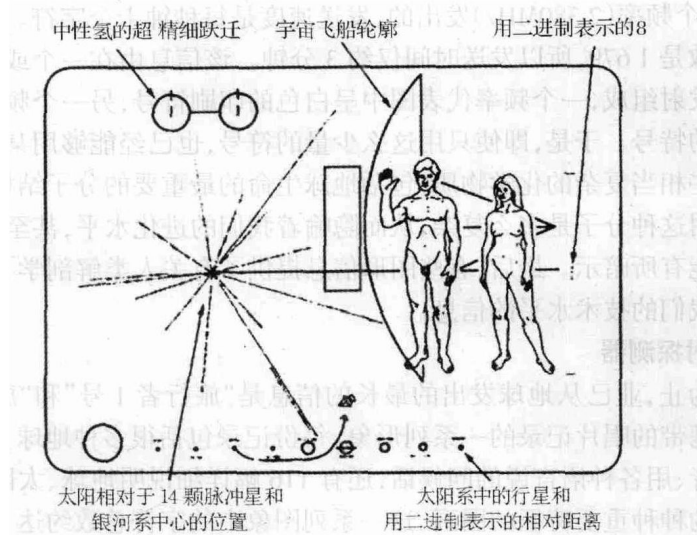



图 6–7 “先驱者”10 号和 11 号携带的“地球名片”

3. 太阳系外行星探测

地外文明不可能出现在恒星上，只能是在行星或者卫星上，基于这一认识，寻找地外文明关键一步便是先找到太阳系外的行星系统。大多数天文学家相信在太阳系以外存在着其它行星，然而它们的普遍程度和性质则一度是个谜。直至 20 世纪 90 年代人类才首次确认太阳系外行星的存在，而自 2002 年起每年都有超过 20 个新发现的系外行星。估计至少 10%的类太阳恒星都有行星系统。

加拿大天文学家布鲁斯·坎贝尔等人在 1988 年利用视向速度法发现围绕仙王座 γ(少卫增八)的行星。然而因为当年技术条件所限，包括发现者本身的天文学界都对结果有所保留。直到了 2003 年才被改进了的观测技术证实。

1993 年，波兰天文学家阿莱克桑德·沃尔兹森及戴尔·弗雷宣布发现一个围绕脉冲星 PSR 1257+12 的行星。这项发现迅速被确认，普遍认为这是首次对系外行星的确认。这些系外行星相信是由超新星的残余物所构成，或是巨型气体行星的固体核心被超新星抛出所形成。

1995 年 10 月 6 日，日内瓦大学的米歇尔·麦耶及戴狄尔·魁若兹宣布首次发现一颗普通主序星飞马座 51 星的行星系统。飞马座 51 星是一颗和太阳类似的恒星，所发现的行星的质量是木星质量的一半，行星的轨道周期约为 4 天，运

行轨道靠恒星比较近，比我们太阳系中的水星离太阳还近。

截至 2006 年 10 月 2 日，人类一共发现了 210 个系外行星。

相比于母星，行星一般都是极为暗淡的，母星的光芒往往会掩盖了系外行星的影像，故此天文学家一般都以间接方法寻找系外行星，现时有 6 种成功的间接方法。当然，直接法也因技术的进步而越来越成为有希望的一种方法。

天体测量法。天体测量法是搜寻系外行星最早期的方法。这个方法是精确地测量恒星在天空的位置及观察那个位置如何随着时间变动。如果恒星有一颗行星，则行星的引力将令恒星在一条微小的圆形轨道上移动。这样一来，恒星和行星围绕着它们共同的质心旋转。由于恒星的质量比行星大得多，它的运行轨道比行星小得多。

2002 年，哈勃太空望远镜首次成功以天体测量法发现 Gliese 876 的行星。未来的太空天文台，例如美国国家航空航天局的太空干涉任务，可能会运用天体测量法发现更多系外行星，但是到目前为止这方法仍未普遍成功。

天体测量法的一项优势是对大轨道的行星最为敏感，因此能和其它对小轨道行星敏感的方法互补不足。然而这方法需要数年以至数十年的观测方能确认结果。

视向速度法。和天体测量法相似，视向速度法同样利用了恒星在行星引力作用下在一条微小圆形轨道上移动这个事实，但是目标是测量恒星向着地球或离开地球的运动速度。根据多普勒效应，恒星的视向速度可以从恒星光谱线的移动推导出来。

因为恒星围绕质心的轨道很微小，其运动速度相对于行星也是非常低的，然而现代的光谱仪可以侦测到少于 1m/s 的速率变动。例如欧洲南方天文台在智利拉西拉天文台的 3.6m 望远镜的高精度视向速度行星搜索器（HARPS，High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher），以及凯克天文台的高分辨率阶梯光栅光谱仪（HIRES）。

视向速度法是目前为止发现最多系外行星的方法，亦称作“多普勒方法”或“摆动方法”。这方法不受距离影响，但需要高信噪比以达到高准确度，因此只适用于 160 光年以内相对离地球较近的恒星。此方法适合用来找寻质量大而轨道小的行星，大轨道的行星则需要多年观测。轨道和地球视向垂直的行星只会造成恒星很小的视向摆动，亦更难发现。视向速度法的一个主要缺点是只能估计行星的最小质量。视向速度法可以用作确认凌“日”法的结果，一同运用亦有助估计行星的真实质量。

脉冲星计时法。脉冲星是超新星爆炸后留下来超高密度的中子星。随着自转，脉冲星发出极为有规律的电磁波脉冲，因此脉冲的轻微异常能显示脉冲星的

移动。和其它星体一样,脉冲星亦会受其行星影响而运动,故此计算其脉冲变动便可估计其行星的性质。

这种方法最初并非设计来侦测系外行星，但其敏感度是各方法之中最高,足以侦测到质量只有地球十分之一的行星。脉冲星计时法亦可以侦测到行星系统内相互的引力扰动,故此可以得到更多有关行星及其轨道的资料。然而因为脉冲星比较罕有,所以亦难以用这方法发现大量行星;而且因为脉冲星附近有极强的高能量辐射,生命似乎难以生存。1992 年阿莱克桑德·沃尔兹森便是利用了这个方法发现了 PSR 1257+12 的行星,而且被迅速确认,成为首个被确认的系外行星系统。

凌“日”法。运用以上的方法可以估计系外行星的质量,而凌“日”法则可估计行星直径。当行星行经其母星和地球之间(即“凌”),则从地球可视的母星光度便会轻微下降。光度下降的程度和母星及行星的大小相关。

这种方法有两个主要缺点。首先，系外行星行经地球和母星之间的几率很小,而且轨道愈大机率便愈小;另外,这一方法亦很容易出现错误侦测。所以,现在凌“日”法的发现必须经其它方法证实。而凌“日”法的主要优点是配合视向速度法能得知行星的密度,从而估计行星的物理结构。直至 2006 年 9 月一共有 9 个系外行星用了这两个方法测量,而它们都是被了解得最深的系外行星。

凌“日”法亦有助了解行星的大气结构。当行星行经其母星,母星光线便会经过行星的最外层大气。只要仔细分析母星的光谱,便能得知行星的大气成份。而把发生次食时(secondary eclipse,即行星被其母星遮掩)的光谱和次食前后的光谱相减,便可直接得到行星的光谱性质,从而得知行星的温度,甚至能侦测到行星上云的形成。2005 年 3 月,两组科学家便利用斯必泽太空望远镜以凌“日”法得知 TrES-1 温度为 1 060K,而 HD 209458 b 则为 1 130K。

引力微透镜法。引力微透镜是引力透镜现象的一种,是星体引力场导致远处另一星体的光线路径改变而造成类似透镜的放大效应,这种现象只会当两个星体和地球几乎成一直线才会出现。因为地球和星体的相对位置不断改变,这种透镜事件只会维持数天至数周。在过去十年,已观测到超过一千次引力微透镜现象。

假若作为透镜的星体拥有行星，则行星本身的引力场亦会对透镜现象造成可测量的影响。因为需要精确对准,天文学家需要监察大量背景星体方能发现行星造成的引力微透镜现象。这种方法对于位处地球和星系中心之间的行星特别有效,因为星系中心可提供大量背景星体。

2002 年，帕琴斯基和安杰依·乌戴斯基等人在 1 个月内发现了数个疑似的行星,但未能证实。至 2006 年,引力微透镜法确认了 4 个系外行星。这是目前唯一可以侦测到围绕主序星公转而质量和地球相仿的行星的方法。

引力微透镜法的显著缺点是透镜效果不能重复观测，因为星体的直线排列

几乎不能再重现。另外，因为这样发现的系外行星往往在数千秒差距之远，故此亦不可能以其它方法再次观测。然而若有足够的背景星体和测量的准确度，这方法有助展示类似地球的行星在星系间的普遍性。

恒星盘法。很多恒星都被尘埃组成的恒星盘包围，这些尘埃吸收了恒星的光再放出红外线，因此可以被观测。即使尘埃的总质量还不及地球，它们的总表面积仍足反映到可观测的红外线。哈勃太空望远镜可以通过其近红外线摄影机和多物体光谱仪观测这些尘埃，而斯必泽太空望远镜可以接收更广阔的红外线光谱以得到更佳的影像。在太阳系附近的恒星之中，已有超过15%的恒星被发现有尘埃盘。

一般相信这些尘埃是由彗星或小行星在碰撞中形成，而在恒星的辐射压力下，很快便会把尘埃推至星际空间。故此侦测到尘埃盘便代表恒星附近有不断的碰撞以补充失散的尘埃，是恒星拥有彗星或小行星的间接证据。

在一些情况下尘埃盘可以显示有行星的存在。有些尘埃盘中间有空洞或形成团状，都可能表示有行星在“清理”其轨道或尘埃受到行星引力影响而结集。在波江座 ε 便发现了有这两种特质的尘埃盘，意味着当中可能有一个轨道半径达40天文单位的行星。

直接摄影法。以上都是间接方法，长期以来，天文学家期望能拍摄到太阳系外行星的图像，给出直接证据。

因为行星相比于其母星都是非常暗淡的，所以一般都会被母星的光掩盖，因此要直接发现系外行星几乎是不可能的。但在一些特殊情况下，现代的望远镜亦可以直接获得系外行星的影像。例如行星体积特别大(明显地大于木星)，与母星有一段较大距离，以及较为年轻(故此温度较高而放出强烈的红外线)。

2004年，天文学家们利用欧洲南方天文台的甚大望远镜阵列在智利拍摄到褐矮星2M1207及其行星2M1207b。2005年12月，2M1207b的行星身份被证实，估计这颗系外行星质量比木星高几倍，而且轨道半径大于40天文单位，直至2006年9月为止这是唯一被直接拍摄到而且被确认的系外行星。

思考与练习

1. 中国和西方在古代有哪些宇宙结构的学说?
2. 现代宇宙学中有哪些比较有影响的宇宙模型?
3. 如何理解地外文明探索的艰巨性?
4. 简述太阳系内地外生命问题研究概况。
5. 人类搜寻太阳系外文明有哪些行动?

主要参考文献

[1] 中国大百科全书编委会. 中国大百科全书·天文学[M]. 上海：中国大百科全书出版社，1980.

[2] 金祖孟，陈自悟. 地球概论 [M].北京：高等教育出版社，1997.

[3] 余明. 简明天文学教程 [M].北京：科学出版社，2007.

[4] 金祖孟，陈自悟. 地球概论[M]. 合肥：安徽教育出版社，1985.

[5] 刘学富. 基础天文学[M]. 北京：高等教育出版社，2004.

[6] 叶叔华. 简明天文学辞典[M]. 上海：上海辞书出版社，1986.

[7] 冯克嘉，杜开云，堵锦生. 中国业余天文学家手册[M]. 北京：高等教育出版社，1993.

[8] 聂清香. 天文学基础[M]. 北京：中国人事出版社，1996.

[9] 刘南. 地球概论[M]. 北京：高等教育出版社，1987.

[10] 胡中为. 普通天文学[M]. 南京：南京大学出版社，2003.

[11] 力强. 星座与希腊神话[M]. 北京：科学普及出版社，1980.

[12] 苏宜. 宇宙掠影——天文学概要[M]. 郑州：河南人民出版社，2006.

[13] 苏宜. 天文学新概论[M]. 武汉：华中理工大学出版社，2000.

[14] 姚亚萍. 天文知识[M]. 北京：北京大学出版社，1999.

[15] 吴鑫基，温学诗. 现代天文学十五讲[M]. 苏州：苏州大学出版社，2005.

[16] [美]吉蒂·弗格森. 孙宏涛，晏凯亮译. 量天：人类探索宇宙边界的历程[M]. 北京：北京大学出版社，1985.

[17] [美]G.B.菲尔德. 欧阳延译. 宇宙演化——天文学入门[M]. 北京：科学出版社，1985.

[18] [美]F.N. 巴什. 王鸣阳，张大卫译. 通俗天文学[M]. 北京：科学普及出版社，1985.

[19] [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德. 江涛，向守平译. 时间之箭[M]. 长沙：湖南科学技术出版社，2000.

[20] 漆贯荣. 时间[M]. 北京：科学出版社，1985.

[21] 唐汉良，舒英发. 历法漫谈[M]. 西安：陕西科学技术出版社，1984.

[22] [美]S. J. 英格利斯. 李致森译. 行星恒星星系[M]. 北京:科学出版社,1979.

[23] 戴文赛. 天体的演化[M]. 北京:科学出版社,1977.

[24] 中国科协青少年工作部, 团中央宣传部. 青少年科技活动全书·天文分册[M]. 北京:中国青年出版社,1985.

[25] 刘南威, 郭有立. 综合自然地理学[M]. 北京:科学出版社,2005.

[26] 刘南威. 自然地理学[M]. 北京:科学出版社,2000.

[27] 李宗伟. 天体物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

[28] 洪韵芳. 天文爱好者手册[M]. 成都:四川辞书出版社,1997.

[29] 何香涛. 观测宇宙学[M]. 北京:科学出版社,2002.

附　录

天文学常用数据

长　度:

1 天文单位(AU)=$1.49597870 \times 10^{11}$m

1 光年(ly)= 9.4605536×10^{15}m = 63239.8AU

1 秒差距(pc)=3.085678×10^{16}m = 206264.8AU = 3.261631ly

时　间:

原子时秒长——铯原子基态的两个超精细能级间在零磁场下跃迁辐射 9192631770 周所持续的时间

平恒星日(从春分点到春分点)= 86164.091 平太阳秒 = 23 时 56 秒 4.091 秒(平太阳时)

地球平均自转周期(从恒星到恒星)= 86164.100 平太阳秒

平太阳日 = 86400 平太阳秒

交点月 = 27.21222 日 = 27 日 05 时 05 分 35.808 秒

分点月(春分点到春分点)= 27.32158 日 = 27 日 07 时 43 分 4.512 秒

近点月 = 27.55455 日 = 27 日 13 时 18 分 33.120 秒

朔望月 = 29.53059 日 = 29 日 12 时 44 分 2.976 秒

恒星月 = 27.32166 日 = 27 日 07 时 43 分 11.424 秒

食年(黄白交点到黄白交点)=346.62003 日

回归年(春分点到春分点)=365.24220 日

格里历年 = 365.2425 日

儒略年 = 365.2500 日

恒星年 = 365.25636 日

近点年 = 365.25964 日

太　阳:

太阳质量 $M_\odot$= 1.9891×10^{33}g	太阳常数 f = 1.97cal cm^{-2} min^{-1}
太阳视差 $\pi_\odot$= 8.794148″	太阳半径 $R_\odot$= 696 265km
太阳表面积 = $6.087 \times 10^{12}km^2$	太阳体积 = $1.412 \times 10^{18}km^3$
太阳平均密度 = 1.409g cm^{-3}	总辐射功率 = 3.83×10^{26}J s^{-1}
太阳表面有效温度 = 5 770K	极区 = 31.1 天
自转会合周期:赤道 = 26.9 天	光谱型 G_2V
目视星等 = -26.74^m	绝对目视星等 = 4.83^m
绝对热星等 = 4.75^m	照度 = 1.27×10^5lx
发光强度 = 2.84×10^{27}cd	太阳表面脱离速度 = 618km s^{-1}
太阳表面重力加速度 = 2.74×10^4cm s^{-2}	太阳中心温度　1.5×10^7K
太阳中心密度　160g cm^{-3}	太阳中心压力　3.4×10^{17}dyne cm^{-2}
地球附近的太阳风速度≈ 450Km s^{-1}	太阳速度 =19.7km s^{-1}
太阳年龄　≈5×10^9年	太阳活动周期的平均长度 = 11.04 年

太阳主要化学成分　氢≈71%、氦≈27%,其余为氧、碳、氮、氖、硅、铁等

续 表:

地 球:
地球质量 $M=5.9742\times10^{27}g$
赤道半径 Re = 6378.140km
极半径 Rp = 6356.755km
平均半径 = 6371.004km
赤道周长 = 40075.13km
纬度 1°长度 = $111.133-0.559\cos2\phi$ km(纬度 ϕ 处)
经度 1°长度 = $111.413\cos\phi-0.094\cos3\phi$ km
标准大气压 P_0=760 毫米汞柱 = 1.03250×10^6dyne cm^{-2}
大气中的声速(0℃)V= 331.36m s^{-1}
大气中的声速(常温)V= 340m s^{-1}
地球表面磁场强度 $\approx5\times10^{-5}$T
地球磁极 76°N, 101°W; 66°S, 140°E
地球表面重力加速度(ϕ = 45°处)g = 9.8061m s^{-2}
地球表面积 = $5.11\times10^8km^2$
陆地面积 = $1.49\times10^8km^2$(地球表面积的 29.2%)
海洋面积 = $3.62\times10^8km^2$(地球表面积的 70.8%)
地球体积 = $1.0832\times10^{12}km^3$
地球平均密度 = 5.518g cm^{-3}
地球年龄 $\approx4.6\times10^9$ 年
地球表面脱离速度 = 11.2km s^{-1}
光行差常数(J2000)k=20.49552″
黄赤交角(J2000) ε = 23°26′21″.448
岁差周期 =25 800 年
平均轨道速度 =29.79km s^{-1}
距离太阳 1 天文单位处脱离太阳的脱离速度 =42.1km s^{-1}

月 球:
月球质量 $M=7.3506\times10^{25}g$ = 1/18.3007(0.0123, 地球 = 1)
月球直径 = 3476.4km
月球体积 = $2.200\times10^{10}km^3$
月球平均密度 = 3.34g cm^{-3}
月地平均距离 = 384401km = 0.00257AU = 60.2682 地球赤道半径
近地点平均距离 = 363300km
远地点平均距离 = 405500km
月球表面积 $\approx$ 1/14 的地球表面积
黄道与白道交角 =5°09′
轨道偏心率 = 0.0549
赤道面与黄道面交角 = 1°32′
赤道面与白道面交角 = 6°41′
平均轨道速度 = 1km s^{-1}
在平均距离处满月的亮度 = -12.7^m
月球表面最高温度 = +127℃
月球表面最低温度 = −183℃
月球表面重力加速度 = 1.62m s^{-2}(为地球表面重力加速度的 1/6)
月球表面脱离速度 = 2.38km s^{-1}
月球年龄 $\approx4.6\times10^9$ 年

四季星图

3月22日21点
仙王座
天龙座
仙女座
仙后座
小熊座
三角座
北冕座
鹿豹座
英仙座
白羊座
牧夫座
猎犬座
大熊座
天猫座
御夫座
巨蛇座
金牛座
后发座
小狮座
双子座
巨蟹座
狮子座
室女座
小犬座
猎户座
六分仪座
长蛇座
麒麟座
波江座
乌鸦座
巨爵座
天兔座
大犬座
长蛇座
罗盘座
唧筒座
船尾座
天鸽座
船帆座
半人马座
船底座

春季星图

6月22日21点
御夫座
仙后座
鹿豹座
天猫座
仙王座
蝎虎座
小熊座
天鹅座
巨蟹座
天龙座
大熊座
狐狸座
天琴座
小狮座
猎犬座
小马座
海豚座
天箭座
北冕座
狮子座
后发座
武仙座
牧夫座
天鹰座
六分仪座
巨蛇座
盾牌座
蛇夫座
室女座
巨蛇座
人马座
巨爵座
天秤座
乌鸦座
长蛇座
天蝎座
豺狼座
南冕座
半人马座
天坛座
矩尺座
南规座

夏季星图

9月22日21点
鹿豹座
猎犬座
金牛座
英仙座
小熊座
牧夫座
仙后座
仙王座
天龙座
北冕座
三角座
仙女座
白羊座
蝎虎座
天鹅座
天琴座
巨蛇座
武仙座
双鱼座
飞马座
狐狸座
天箭座
鲸鱼座
海豚座
小马座
天鹰座
蛇夫座
宝瓶座
盾牌座
巨蛇座
摩羯座
人马座
玉夫座
南鱼座
显微镜座
天蝎座
天鹤座
南冕座
凤凰座
望远镜座
印地安座

秋季星图

12月22日21点
小熊座
大熊座
小狮座
天龙座
鹿豹座
天猫座
仙王座
天鹅座
狐狸座
仙后座
蝎虎座
巨蟹座
御夫座
英仙座
仙女座
小马
双子座
飞马座
三角座
金牛座
小犬座
白羊座
双鱼座
宝瓶座
猎户座
麒麟座
鲸鱼座
波江座
天兔座
大犬座
天炉座
玉夫座
天鸽座
雕具座
时钟座
绘架座
凤凰座

冬季星图

四瓣简明星图

中国古代星空划分

我国古人为了便于认星和观测，把若干颗恒星组成一组，每组用地上的一种事物命名，这一组就称为一个星官，简称一官。唐宋后也有称之为一座的。但这种星座并不包含星空区划的涵义，与现今所说的星座概念有所不同。三国时期形成的星官系统包括 283 官，共 1464 颗星，为后代天文学家所沿用。各个星官所包含的星数多寡不等，少到一个，多到几十个，所占的天区范围也各不相同。在众多的星官中，有 31 个占有很重要的地位，这就是三垣二十八宿。在唐代，三垣二十八宿发展成为中国古代的星空划分体系。

三垣指紫微垣、太微垣、天市垣。紫微垣包括北天极附近的天区，大体相当于拱极星区；太微垣包括室女、后发、狮子等星座的一部分；天市垣包括蛇夫、武仙、巨蛇、天鹰等星座的一部分。

二十八宿又称为二十八星或二十八舍。最初是古人为比较日、月、金、木、水、火、土的运动而选择的二十八个星官，作为观测时的标记。“宿”的意思和西方黄道十二宫的“宫”类似，表示日月五星所在的位置。但其分布并不与黄道完全一致，而是在黄道两旁一定范围内。二十八宿从角宿开始，自西向东排列，与日、月视运动的方向相同。

二十八宿按东、北、西、南四个方位分作四组，每组七宿，分别与四种颜色、五种四组动物形象相匹配，叫做四象，对应关系如下：东方苍龙，青色；北方玄武（龟蛇），黑色；西方白虎，白色；南方朱雀，红色。

东方七宿：角、亢、氐、房、心、尾、箕；北方七宿：斗、牛、女、虚、危、室（营室）、壁（东壁）；西方七宿：奎、娄、胃、昴、毕、觜、参；南方七宿：井（东井）、鬼（舆鬼）、柳、星（七星）、张、翼、轸。此外还有贴近这些星官与它们关系密切的一些星官，如坟墓、离宫、附耳、伐、钺、积尸、右辖、左辖、长沙、神宫等，分别附属于房、危、室、毕、参、井、鬼、轸、尾等宿内，称为辅官或辅座。唐代的二十八宿包括辅官或辅座星在内总共有星 183 颗。

宿名	目视星等	国际名		位置	
		编号	星座名	赤经	赤纬
角宿一	1	67 α	Vir 室女座	13h 25m	−11°9′
角宿二	3	79 ζ	Vir 室女座	13h 34m	−0°35′
亢宿一	4	98 κ	Vir 室女座	14h 12m	−10°16′
亢宿二	4	99 ι	Vir 室女座	14h 16m	−5°59′
亢宿三	5	105 φ	Vir 室女座	14h 28m	−2°13′
亢宿四	5	100 λ	Vir 室女座	14h 19m	−13°22′
氐宿一	3	9 α^2	Lib 天秤座	14h 50m	−16°2′
氐宿二	5	24 ι	Lib 天秤座	15h 12m	−19°47′
氐宿三	4	38 γ	Lib 天秤座	15h 35m	−14°47′
氐宿四	3	27 β	Lib 天秤座	15h 17m	−9°22′
房宿一	3	6 π	Sco 天蝎座	15h 58m	−26°6′
房宿二	4	5 ρ	Sco 天蝎座	15h 56m	−29°12′
房宿三	2	7 δ	Sco 天蝎座	16h 00m	−22°37′
房宿四	3	8 β^1	Sco 天蝎座	16h 05m	−19°48′
a 钩钤一	4	9 ω^1	Sco 天蝎座	16h 06m	−20°40′
a 钩钤二	4	10 ω^2	Sco 天蝎座	16h 07m	−20°52′
心宿一	3	20 σ	Sco 天蝎座	16h 21m	−25°35′
心宿二	1	21 α	Sco 天蝎座	16h 29m	−26°25′
心宿三	3	23 τ	Sco 天蝎座	16h 35m	−28°12′
尾宿一	3	μ^1	Sco 天蝎座	16h 51m	−38°2′
尾宿二	2	26 ε	Sco 天蝎座	16h 50m	−34°17′
尾宿三	4	ζ	Sco 天蝎座	16h 54m	−42°21′
尾宿四	3	η	Sco 天蝎座	17h 12m	−43°14′
尾宿五	2	θ	Sco 天蝎座	17h 37m	−42°59′
尾宿六	3	ι^1	Sco 天蝎座	17h 47m	−40°7′
尾宿七	2	κ	Sco 天蝎座	17h 42m	−39°1′
尾宿八	2	35 λ	Sco 天蝎座	17h 33m	−37°6′
尾宿九	3	34 υ	Sco 天蝎座	17h 30m	−37°17′
a 神宫	3	μ^2	Sco 天蝎座	16h 52m	−38°1′
箕宿一	3	10 γ	Sgr 人马座	18h 05m	−30°25′
箕宿二	3	19 δ	Sgr 人马座	18h 20m	−29°49′
箕宿三	2	20 ε	Sgr 人马座	18h 24m	−34°23′
箕宿四	3	η	Sgr 人马座	18h 17m	−36°45′
斗宿一	3	27 φ	Sgr 人马座	18h 45m	−26°59′
斗宿二	3	22 λ	Sgr 人马座	18h 27m	−25°25′
斗宿三	4	13 μ	Sgr 人马座	18h 13m	−21°3′
斗宿四	2	34 σ	Sgr 人马座	18h 55m	−26°17′
斗宿五	3	40 τ	Sgr 人马座	19h 06m	−27°40′
斗宿六	3	38 ζ	Sgr 人马座	19h 02m	−29°52′
牛宿一	3	9 β	Cap 摩羯座	20h 21m	−14°46′
牛宿二	4	6 α^2	Cap 摩羯座	20h 18m	−12°32′
牛宿三	6	2 ξ^2	Cap 摩羯座	20h 12m	−12°37′
牛宿四	5	10 π	Cap 摩羯座	20h 27m	−18°12′
牛宿五	6	12 o	Cap 摩羯座	20h 29m	−18°34′
牛宿六	5	11 ρ	Cap 摩羯座	20h 28m	−17°48′
女宿一	4	2 ε	Aqr 宝瓶座	20h 47m	−9°29′

续　表:

宿名	目视星等	国际名		位置	
		编号	星座名	赤经	赤纬
女宿二	5	6 μ	Aqr 宝瓶座	20h 52m	−8°58′
女宿三	6	4(5)	Aqr 宝瓶座	20h 52m	−5°30′
女宿四	5	3 κ	Aqr 宝瓶座	20h 47m	−5°1′
虚宿一	3	22 β	Aqr 宝瓶座	21h 31m	−5°34′
虚宿二	4	8 α	Equ 小马座	21h 15m	+5°14′
危宿一	3	34 α	Aqr 宝瓶座	22h 05m	−0°19′
危宿二	4	26 θ	Peg 飞马座	22h 10m	+6°11′
危宿三	2	8 ε	Peg 飞马座	21h 44m	+9°52′
a 坟墓一	4	55 ζ	Aqr 宝瓶座	22h 28m	−0°1′
a 坟墓二	4	48 γ	Aqr 宝瓶座	22h 21m	−1°23′
a 坟墓三	4	62 η	Aqr 宝瓶座	22h 35m	−0°7′
a 坟墓四	5	52 π	Aqr 宝瓶座	22h 25m	+1°22′
室宿一	2	54 α	Peg 飞马座	23h 04m	+15°12′
室宿二	2	53 β	Peg 飞马座	23h 03m	+28°4′
a 离宫一	4	47 λ	Peg 飞马座	22h 46m	+23°33′
a 离宫二	4	48 μ	Peg 飞马座	22h 50m	+24°36′
a 离宫三	5	43 ο	Peg 飞马座	22h 41m	+29°18′
a 离宫四	3	44 η	Peg 飞马座	22h 43m	+30°13′
a 离宫五	5	62 τ	Peg 飞马座	23h 20m	+23°44′
a 离宫六	4	68 υ	Peg 飞马座	23h 25m	+23°24′
壁宿一	3	88 γ	Peg 飞马座	00h 13m	+15°11′
壁宿二	2	21 α	And 仙女座	00h 08m	+29°5′
奎宿一	4	38 η	And 仙女座	00h 57m	+23°25′
奎宿二	4	34 ζ	And 仙女座	00h 47m	+24°16′
奎宿三	5	64(65) ι	Psc 双鱼座	00h 48m	+16°56′
奎宿四	4	30 ε	And 仙女座	00h 38m	+29°18′
奎宿五	3	31 δ	And 仙女座	00h 39m	+30°51′
奎宿六	4	29 π	And 仙女座	00h 36m	+33°43′
奎宿七	5	35 ν	And 仙女座	00h 49m	+41°4′
奎宿八	4	37 μ	And 仙女座	00h 56m	+38°29′
奎宿九	2	43 β	And 仙女座	01h 09m	+35°37′
奎宿十	6	76(66)	Psc 双鱼座	00h 54m	+19°11′
奎宿十一	5	83 τ	Psc 双鱼座	01h 11m	+30°5′
奎宿十二	5	91 I	Psc 双鱼座	01h 21m	+28°44′
奎宿十三	5	90 υ	Psc 双鱼座	01h 19m	+27°15′
奎宿十四	5	85 φ	Psc 双鱼座	01h 13m	+24°35′
奎宿十五	5	84 χ	Psc 双鱼座	01h 11m	+21°2′
奎宿十六	5	74 ψ¹	Psc 双鱼座	01h 05m	+21°28′
娄宿一	3	6 β	Ari 白羊座	01h 54m	+20°48′
娄宿二	5	5 γ	Ari 白羊座	01h 53m	+19°17′
娄宿三	2	13 α	Ari 白羊座	02h 07m	+23°27′
胃宿一	5	35	Ari 白羊座	02h 43m	+27°42′
胃宿二	5	39	Ari 白羊座	02h 47m	+29°14′
胃宿三	4	41 c	Ari 白羊座	02h 49m	+27°15′
昴宿一	4	17	Tau 金牛座	03h 44m	+24°6′

续　表:

宿名	目视星等	国际名		位置	
		编号	星座名	赤经	赤纬
昴宿二	4	19 q	Tau 金牛座	03h 45m	+24°28'
昴宿三	6	21	Tau 金牛座	03h 45m	+24°33'
昴宿四	4	20	Tau 金牛座	03h 45m	+24°22'
昴宿五	4	23	Tau 金牛座	03h 46m	+23°56'
昴宿六	3	25 η	Tau 金牛座	03h 47m	+24°6'
昴宿七	4	27	Tau 金牛座	03h 49m	+24°3'
毕宿一	4	74 ε	Tau 金牛座	04h 28m	+19°10'
毕宿二	4	68	Tau 金牛座	04h 25m	+17°55'
毕宿三	4	61 δ	Tau 金牛座	04h 22m	+17°32'
毕宿四	4	54 γ	Tau 金牛座	04h 19m	+15°37'
毕宿五	1	87 α	Tau 金牛座	04h 35m	+16°30'
毕宿六	4	77 θ^{1}	Tau 金牛座	04h 28m	+15°57'
毕宿七	4	71	Tau 金牛座	04h 26m	+15°37'
毕宿八	3	35 λ	Tau 金牛座	04h 00m	+12°29'
a 附耳	5	92 σ^{2}	Tau 金牛座	04h 39m	+15°55'
觜宿一	4	39 λ	Ori 猎户座	05h 35m	+9°56'
觜宿二	4	37 ϕ^{1}	Ori 猎户座	05h 34m	+9°29'
觜宿三	4	40 ϕ^{2}	Ori 猎户座	05h 36m	+9°17'
参宿一	2	50 ζ	Ori 猎户座	05h 40m	−1°56'
参宿二	2	46 ε	Ori 猎户座	05h 36m	−1°12'
参宿三	2	34 δ	Ori 猎户座	05h 32m	−0°17'
参宿四	1	58 α	Ori 猎户座	05h 55m	+7°24'
参宿五	2	24 γ	Ori 猎户座	05h 25m	+6°20'
参宿六	2	53 κ	Ori 猎户座	05h 47m	−9°40'
参宿七	0	19 β	Ori 猎户座	05h 14m	−8°12'
a 伐一	5	42 c	Ori 猎户座	05h 35m	−4°50'
a 伐二	5	43 θ^{2}	Ori 猎户座	05h 35m	−5°24'
a 伐三	3	44 ι	Ori 猎户座	05h 35m	−5°54'
井宿一	3	13 μ	Gem 双子座	06h 22m	+22°30'
井宿二	4	18 ν	Gem 双子座	06h 28m	+20°12'
井宿三	2	24 γ	Gem 双子座	06h 37m	+16°23'
井宿四	3	31 ξ	Gem 双子座	06h 45m	+12°53'
井宿五	3	27 ε	Gem 双子座	06h 43m	+25°7'
井宿六	5	36 d	Gem 双子座	06h 51m	+21°45'
井宿七	4	43 ζ	Gem 双子座	07h 04m	+20°34'
井宿八	4	54 λ	Gem 双子座	07h 18m	+16°32'
a 钺	3	7 η	Gem 双子座	06h 14m	+22°30'
鬼宿一	5	31 θ	Cnc 巨蟹座	08h 31m	+18°5'
鬼宿二	5	33 η	Cnc 巨蟹座	08h 32m	+20°26'
鬼宿三	5	43 γ	Cnc 巨蟹座	08h 43m	+21°28'
鬼宿四	4	47 δ	Cnc 巨蟹座	08h 44m	+18°9'
a 积尸气		M44	Cnc 巨蟹座		
柳宿一	4	4 δ	Hya 长蛇座	08h 37m	+5°42'
柳宿二	4	5 σ	Hya 长蛇座	08h 38m	+3°20'
柳宿三	4	7 η	Hya 长蛇座	08h 43m	+3°23'

续　表:

宿名	目视星等	国际名		位置	
		编号	星座名	赤经	赤纬
柳宿四	4	13 ρ	Hya 长蛇座	08h 48m	+5°50'
柳宿五		11 ε	Hya 长蛇座		
柳宿六	3	16 ζ	Hya 长蛇座	08h 55m	+5°56'
柳宿七	5	18 ω	Hya 长蛇座	09h 05m	+5°5'
柳宿八	4	22 θ	Hya 长蛇座	09h 14m	+2°18'
星宿一	2	30 α	Hya 长蛇座	09h 27m	−8°39'
星宿二	5	31 τ^1	Hya 长蛇座	09h 29m	−2°46'
星宿三	5	32 τ^2	Hya 长蛇座	09h 31m	−1°11'
星宿四	4	35 ι	Hya 长蛇座	09h 39m	−1°8'
星宿五	5	27 p	Hya 长蛇座	09h 20m	−9°33'
星宿六	5	26	Hya 长蛇座	09h 19m	−11°58'
星宿七		GC13148	Hya 长蛇座		
张宿一	4	39 υ^1	Hya 长蛇座	09h 51m	−14°50'
张宿二	4	41 λ	Hya 长蛇座	10h 10m	−12°21'
张宿三	4	42 μ	Hya 长蛇座	10h 26m	−16°50'
张宿四	5	(GC13839)	Hya 长蛇座	09h 54m	−19°0'
张宿五	5	38 κ	Hya 长蛇座	09h 40m	−14°19'
张宿六	5	φ	Hya 长蛇座	10h 38m	−16°52'
翼宿一	4	7 α	Crt 巨爵座	10h 59m	−18°17'
翼宿二	4	15 γ	Crt 巨爵座	11h 24m	−17°41'
翼宿三	5	27 ζ	Crt 巨爵座	11h 44m	−18°21'
翼宿四	5	13 λ	Crt 巨爵座	11h 23m	−18°46'
翼宿五	3	ν	Hya 长蛇座	10h 49m	−16°11'
翼宿六	5	30 η	Crt 巨爵座	11h 56m	−17°9'
翼宿七	4	12 δ	Crt 巨爵座	11h 19m	−14°46'
翼宿八	5	24 ι	Crt 巨爵座	11h 38m	−13°12'
翼宿九	6	16 κ	Crt 巨爵座	11h 27m	−12°21'
翼宿十	5	14 ε	Crt 巨爵座	11h 24m	−10°51'
翼宿十一			Crt 巨爵座		
翼宿十二		GC15173	Crt 巨爵座		
翼宿十三	5	21 θ	Crt 巨爵座	11h 36m	−9°48'
翼宿十四		GC16178	Crt 巨爵座		
翼宿十五			Crt 巨爵座		
翼宿十六	4	11 β	Crt 巨爵座	11h 11m	−22°49'
翼宿二十	5	χ^1	Hya 长蛇座	11h 05m	−27°17'
轸宿一	3	4 γ	Crv 乌鸦座	12h 15m	−17°32'
轸宿二	3	2 ε	Crv 乌鸦座	12h 10m	−22°37'
轸宿三	3	7 δ	Crv 乌鸦座	12h 29m	−16°30'
轸宿四	3	9 β	Crv 乌鸦座	12h 34m	−23°23'
a 右辖	4	1 α	Crv 乌鸦座	12h 08m	−24°43'
a 左辖	4	8 η	Crv 乌鸦座	12h 32m	−16°11'
a 长沙	5	5 ζ	Crv 乌鸦座	12h 20m	−22°12'

注:a 为辅官星。

88星座表

英文名称	缩写	中文名称	面积	上中天时间[b]	1-2-3-4等星数目	α星(2002年5月)		
						赤经(h m)	赤纬(° ′)	目视星等
Andromeda	And	仙女座	722	11月27日	0-3-1-11	00 09	+29 06	2.06
Antlia	Ant	唧筒座	239	4月17日	0-0-0-1	10 27	-31 05	4.25
Apus	Aps	a天燕座	206	7月18日	0-0-0-3	14 48	-79 03	3.83
Aquarius	Aqr	宝瓶座	980	11月1日	0-0-2-13	22 06	-00 18	2.96
Aquila	Aql	天鹰座	652	9月10日	1-0-4-6	19 51	+08 53	0.77
Ara	Ara	天坛座	237	8月5日	0-0-3-5	17 32	-49 53	2.95
Aries	Ari	白羊座	441	12月25日	0-1-1-2	02 07	+23 28	2.00
Auriga	Aur	御夫座	657	2月15日	1-1-4-4	05 16	+46 00	0.08
Bootes	Boo	牧夫座	907	6月26日	1-0-3-10	14 16	+19 10	-0.04
Caelum	Cae	雕具座	125	1月29日	0-0-0-0	04 41	-41 52	4.45
Camelopardalis	Cam	鹿豹座	757	2月10日	0-0-0-4	04 54	+66 21	4.29
Cancer	Cnc	巨蟹座	506	3月26日	0-0-0-6	08 59	+11 51	4.25
Canes Venatici	CVn	猎犬座	465	8月2日	0-0-1-1	12 56	+38 18	2.90
Canis Major	CMa	大犬座	380	2月26日	1-4-2-11	06 45	-16 43	-1.46
Canis Minor	CMi	小犬座	183	3月11日	1-0-1-0	07 39	+05 13	0.38
Capricornus	Cap	摩羯座	414	9月30日	0-0-2-7	20 18	-12 32	2.57
Carina	Car	船底座	494	8月2日	1-3-3-18	06 24	-52 42	-0.72
Cassiopeia	Cas	仙后座	598	12月2日	0-3-2-5	00 41	+56 33	2.23
Centaurus	Cen	半人马座	1060	6月7日	2-2-8-21	14 40	-60 51	-0.01
Cepheus	Cep	仙王座	588	10月17日	0-0-3-10	21 19	+62 36	2.44
Cetus	Cet	鲸鱼座	1231	12月13日	0-2-1-11	03 02	+04 06	2.53
Chamaeleon	Cha	a蝘蜓座	132	4月28日	0-0-0-4	08 21	-77 30	4.07
Circinus	Cir	圆规座	93	6月30日	0-0-1-1	14 43	-64 59	3.19
Columba	Col	天鸽座	270	2月10日	0-0-2-4	05 40	-34 04	2.64
Coma Berenices	Com	后发座	386	5月28日	0-0-0-2	13 10	+17 32	4.32
Corona Australis	CrA	南冕座	128	8月25日	0-0-0-4	19 10	-37 54	4.11
Corona Borealis	CrB	北冕座	179	7月13日	0-1-0-4	15 35	+26 42	2.23
Corvus	Crv	乌鸦座	184	5月23日	0-0-4-2	12 09	-24 45	4.02
Crater	Crt	巨爵座	282	5月8日	0-0-0-3	11 00	-18 19	4.08
Crux	Cru	南十字座	68	5月23日	1-2-1-5	12 27	-63 07	1.33
Cygnus	Cyg	天鹅座	804	9月25日	1-1-4-18	20 41	+45 17	1.25
Delphinus	Del	海豚座	189	9月26日	0-0-0-4	20 40	+15 55	3.77
Dorado	Dor	剑鱼座	179	1月31日	0-0-1-2	04 34	-55 02	3.27
Draco	Dra	天龙座	1083	3月28日	0-1-5-9	14 47	+64 23	3.65

续 表:

英文名称	缩写	中文名称	面积	上中天时间[b]	1-2-3-4 等星数目	α 星(2002 年 5 月)		
						赤经 (h m)	赤纬 (° ′)	目视星等
Equuleus	Equ	小马座	72	10 月 5 日	0–0–0–1	21 16	+05 16	3.92
Eridanus	Eri	波江座	1138	1 月 14 日	1–0–3–24	01 38	–57 13	0.46
Fornax	For	天炉座	398	12 月 23 日	0–0–0–1	03 12	–28 59	3.87
Gemini	Gem	双子座	514	3 月 3 日	1–2–4–12	07 35	+31 53	1.98
Grus	Gru	天鹤座	366	10 月 22 日	0–2–1–6	22 08	–46 57	1.74
Hercules	Her	武仙座	1225	8 月 5 日	0–0–6–19	17 15	+14 23	3.48
Horologium	Hor	时钟座	249	1 月 6 日	0–0–0–2	04 14	–42 17	3.86
Hydra	Hya	长蛇座	1303	4 月 25 日	0–1–5–13	09 28	–08 04	1.98
Hydrus	Hyi	a 水蛇座	243	12 月 27 日	0–0–3–2	01 59	–61 33	2.86
Indus	Ind	印第安座	294	10 月 7 日	0–0–1–2	20 38	–47 17	3.11
Lacerta	Lac	蝎虎座	201	10 月 24 日	0–0–0–2	22 31	+50 18	3.77
Leo	Leo	狮子座	947	4 月 25 日	1–2–3–12	10 09	+11 57	1.35
Leo Minor	LMi	小狮座	232	4 月 22 日	0–0–0–3	10 53	+34 12	3.83
Lepus	Lep	天兔座	290	2 月 6 日	0–0–4–6	05 32	–17 49	2.58
Libra	Lib	天秤座	538	7 月 6 日	0–0–3–4	14 51	–16 03	2.75
Lupus	Lup	豺狼座	334	7 月 3 日	0–0–4–16	14 42	–47 24	2.30
Lynx	Lyn	天猫座	545	3 月 16 日	0–0–1–5	09 21	+34 23	3.13
Lyra	Lyr	天琴座	286	8 月 29 日	1–0–2–6	18 37	+38 47	0.03
Mensa	Men	a 山案座	153	2 月 10 日	0–0–0–0	06 10	–74 45	5.09
Microscopium	Mic	显微镜座	210	9 月 30 日	0–0–0–0	20 50	–33 40	4.90
Monoceros	Mon	麒麟座	482	3 月 3 日	0–0–3–6	07 41	–09 33	3.93
Musca	Mus	a 苍蝇座	138	5 月 26 日	0–0–2–4	12 38	–69 09	2.69
Norma	Nor	矩尺座	165	7 月 18 日	0–0–0–1	16 20	–50 10	4.02[c]
Octans	Oct	a 南极座	291	10 月 2 日	0–0–0–3	21 00	–77 00	5.13
Ophiuchus	Oph	蛇夫座	948	8 月 5 日	0–1–7–15	17 35	+12 34	2.08
Orion	Ori	猎户座	594	2 月 5 日	2–5–3–15	05 55	+07 24	0.50
Pavo	Pav	孔雀座	378	9 月 5 日	0–1–0–10	20 26	–56 44	1.94
Pegasus	Peg	飞马座	1121	10 月 25 日	0–1–4–9	23 05	+15 13	2.49
Perseus	Per	英仙座	615	1 月 6 日	0–2–5–15	03 25	+49 52	1.79
Phoenix	Phe	凤凰座	469	12 月 2 日	0–1–2–5	00 26	–42 18	2.39
Pictor	Pic	绘架座	247	2 月 8 日	0–0–1–2	06 48	–61 57	3.27
Pisces	Psc	双鱼座	889	11 月 22 日	0–0–0–7	02 02	+02 47	4.18
Piscis Austrinus	PsA	南鱼座	245	10 月 17 日	1–0–0–5	22 58	–29 37	1.16
Puppis	Pup	船尾座	673	3 月 13 日	0–1–7–13	08 04	–40 01	2.25[d]
Pyxis	Pyx	罗盘座	221	3 月 31 日	0–0–0–3	08 44	–33 12	3.68
Reticulum	Ret	网罟座	114	1 月 14 日	0–0–1–4	04 14	–62 28	3.35
Sagitta	Sge	天箭座	80	9 月 12 日	0–0–0–4	19 40	+18 01	4.37
Sagittarius	Sgr	人马座	867	9 月 2 日	0–2–8–10	19 24	–40 37	3.97
Scorpius	Sco	天蝎座	497	7 月 23 日	1–3–10–10	16 30	–26 26	0.96
Sculptor	Scl	玉夫座	475	11 月 25 日	0–0–0–2	00 59	+29 21	4.31
Scutum	Sct	盾牌座	109	8 月 25 日	0–0–0–2	18 35	–08 15	3.85
Serpens	Ser	巨蛇座	637	7 月 8 日	0–0–0–12	15 44	+06 25	2.65
Sextans	Sex	六分仪座	314	4 月 20 日	0–0–0–0	10 08	–00 23	4.49

续 表:

英文名称	缩写	中文名称	面积	上中天时间[b]	1-2-3-4等星数目	α星(2002年5月)		
						赤经(h m)	赤纬(° ′)	目视星等
Taurus	Tau	金牛座	797	1月24日	1-1-2-23	04 36	+16 31	0.85
Telescopium	Tel	望远镜座	252	9月2日	0-0-0-2	18 27	-45 58	3.51
Triangulum	Tri	三角座	132	12月17日	0-0-1-2	01 53	+29 35	3.41
Triangulum Austale	TrA	a南三角座	110	7月13日	0-1-1-2	16 49	-69 02	1.92
Tucana	Tuc	a杜鹃座	295	11月13日	0-0-1-3	22 19	-60 15	2.86
Ursa Major	UMa	大熊座	1280	5月3日	0-5-7-8	11 04	+61 44	1.80
Ursa Minor	UMi	小熊座	256	7月13日	0-2-1-4	02 35	+89 17	2.02
Vela	Vel	船帆座	500	4月10日	0-3-2-14	08 10	-47 21	1.78[e]
Virgo	Vir	室女座	1294	6月7日	1-0-3-11	13 25	-11 10	0.98
Volans	Vol	a飞鱼座	141	3月13日	0-0-0-6	09 02	-66 24	4.00
Vulpecula	Vul	狐狸座	268	9月20日	0-0-0-0	19 29	+24 40	4.44

注:a为我国基本看不见的星座;b指晚8时星座中央上中天的日期;c无 α 星,此为 γ 星;d无 α 星,此为 ζ 星;e无 α 星,此为 γ 星。

最亮的21颗恒星

排名	中文名	国际通用名	所属星座	目视星等	目视绝对星等	距离(光年)	光谱型
1	天狼星	Sirius	大犬座	-1.46	1.4	8.6	A1
2	老人星	Canopus	船底座	-0.72	-2.5	74	F0
3	南门二	Rigil Kentaurus	半人马座	-0.27	4.4	4.3	G2
4	大角星	Arcturus	牧夫座	-0.04	0.2	36	K2
5	织女星	Vega	天琴座	0.03	0.6	26.5	A0
6	五车二	Capella	御夫座	0.08	0.4	45	G8
7	参宿七	Rigel	猎户座	0.1	-8.1	900	B8
8	南河三	Procyon	小犬座	0.38	2.6	11.3	F5
9	参宿四	Betelgeux	猎户座	0.4(var.)	-7.2	470	M2
10	水委一	Achernar	波江座	0.46	-1.3	120	B5
11	马腹一	Agena	半人马座	0.61(var.)	-4.4	500	B1
12	牛郎星	Altair	天鹰座	0.77	2.3	16.5	A7
13	十字架二	Acrux	南十字座	0.83	-4.6	400	B2
14	毕宿五	Aldebaran	金牛座	0.85(var.)	-0.3	68	K5
15	心宿二	Antares	天蝎座	0.96(var.)	-5.2	520	M1
16	角宿一	Spica	室女座	0.98(var.)	-3.2	250	B1
17	北河三	Pollux	双子座	1.14	0.7	35	K0
18	北落师门	Fomalhaut	南鱼座	1.16	2.0	23	A3
19	天津四	Deneb	天鹅座	1.25	-7.2	1600	A2
20	十字架三	Becrux	南十字座	1.25(var.)	-4.7	500	B0
21	轩辕十四	Regulus	狮子座	1.35	-0.3	85	B7

梅西耶天体表

编号	赤经	赤纬	视径	目视星等	距离(光年)	星座	注释
M1	05h34.5m	+22°01'	36×34	8.4	7200	金牛座	蟹状星云
M2	21h33.5m	-00°49'	13	6.5	40000	宝瓶座	球状星团
M3	13h42.5m	+28°23'	16	6.4	35000	猎犬座	球状星团
M4	16h23.6m	-26°32'	26	5.9	14000	天蝎座	球状星团
M5	15h18.6m	+02°05'	17	5.8	26000	巨蛇座	球状星团
M6	17h40.1m	-32°13'	15	4.2	1900	天蝎座	疏散星团
M7	17h53.9m	-34°49'	80	3.3	800	天蝎座	疏散星团
M8	18h03.8m	-24°23'	90×40	5.8	3900	人马座	弥漫星云
M9	17h19.2m	-18°31'	9	7.9	26000	蛇夫座	球状星团
M10	16h57.1m	-04°06'	15	6.6	20000	蛇夫座	球状星团
M11	18h51.1m	-06°16'	14	5.8	5600	盾牌座	疏散星团
M12	16h47.2m	-01°57'	15	6.6	24000	蛇夫座	球状星团
M13	16h41.7m	+36°28'	17	5.9	21000	武仙座	球状星团
M14	17h37.6m	-03°15'	12	7.6	47000	蛇夫座	球状星团
M15	21h30.0m	+12°10'	12	5.4	34000	飞马座	球状星团
M16	18h18.8m	-13°47'	35	6	5500	巨蛇座	弥漫星云
M17	18h20.8m	-16°11'	46×37	7	5200	人马座	弥漫星云
M18	18h19.9m	-17°08'	9	6.9	6300	人马座	疏散星团
M19	17h02.6m	-26°16'	14	7.2	22000	蛇夫座	球状星团
M20	18h02.3m	-23°02'	29×27	6.3	3300	人马座	三叶星云
M21	18h04.6m	-22°30'	13	5.9	4100	人马座	疏散星团
M22	18h36.4m	-23°54'	24	5.1	10000	人马座	球状星团
M23	17h56.8m	-19°01'	27	5.5	4500	人马座	疏散星团
M24	18h18.4m	-18°25'	90	4.5	16000	人马座	疏散星团
M25	18h31.6m	-19°15'	32	4.6	2000	人马座	疏散星团
M26	18h45.2m	-09°24'	15	8	4900	盾牌座	疏散星团
M27	19h59.6m	+22°43'	8×4	8.1	720	狐狸座	行星状星云
M28	18h24.5m	-24°52'	11	6.9	15000	人马座	球状星团
M29	20h23.9m	+38°32'	7	6.6	3000	天鹅座	疏散星团
M30	21h40.4m	-23°11'	11	7.5	41000	魔羯座	球状星团
M31	00h42.7m	+41°16'	178×63	3.4	2100000	仙女座	仙女座大星云
M32	00h42.7m	+40°52'	8×6	8.2	2100000	仙女座	星系
M33	01h33.9m	+30°39'	62×39	5.7	2400000	三角座	星系
M34	02h42.0m	+42°47'	35	5.2	1400	英仙座	疏散星团
M35	06h08.9m	+24°20'	28	5.1	2600	双子座	疏散星团
M36	05h36.1m	+34°08'	12	6	4100	御夫座	疏散星团

续　表:

编号	赤经	赤纬	视径	目视星等	距离(光年)	星座	注释
M37	05h52.4m	−32°33'	24	5.6	3900	御夫座	疏散星团
M38	05h28.7m	+35°50'	21	6.4	3900	御夫座	疏散星团
M39	21h32.2m	+48°26'	32	4.6	830	天鹅座	疏散星团
M40	12h22.4m	+58°05'	–	9.0/9.6	–	大熊座	光学双星
M41	06h47.0m	−20°44'	38	4.5	2500	大犬座	疏散星团
M42	05h35.4m	−05°27'	66×60	4	1500	猎户座	最亮的星云
M43	05h35.6m	−05°16'	20×15	9	1600	猎户座	弥漫星云
M44	08h40.1m	+19°59'	95	3.1	520	巨蟹座	疏散星团
M45	03h47.0m	+24°07'	110	1.2	410	金牛座	昴星团
M46	07h41.8m	−14°49'	27	6.1	6000	船尾座	疏散星团
M47	07h36.6m	−14°30'	30	4.4	1800	船尾座	疏散星团
M48	08h13.8m	−05°48'	54	5.8	1500	长蛇座	疏散星团
M49	12h29.8m	+08°00'	9×7	8.4	44000000	室女座	星系
M50	07h03.2m	+08°20'	16	5.9	2600	麒麟座	疏散星团
M51	13h29.9M	+47°12'	11×8	8.1	18000000	猎犬座	星系
M52	23h24.2m	+61°35'	13	6.9	3800	仙后座	疏散星团
M53	13h12.9m	+18°10'	13	7.7	65000	后发座	球状星团
M54	18h55.1M	−30°29'	9	7.7	49000	人马座	球状星团
M55	19h40.0m	−30°58'	19	7	19000	人马座	球状星团
M56	19h16.6m	+30°11'	7	8.2	34000	天琴座	球状星团
M57	18h53.6m	+33°02'	2.5	9	2300	天琴座	行星状星云
M58	12h37.7m	+11°49'	5×4	9.8	41000000	室女座	星系
M59	12h42.0m	+11°39'	5×3	9.8	41000000	室女座	星系
M60	12h43.7m	+11°33'	7×6	8.8	41000000	室女座	星系
M61	12h21.9m	+04°28'	6×6	6.6	41000000	室女座	星系
M62	17h01.2m	+30°07'	14	8.8	38000	蛇夫座	球状星团
M63	13h15.8m	+42°02'	12×8	8.6	18000000	猎犬座	星系
M64	12h56.7m	+21°41'	9×5	8.5	15000000	后发座	星系
M65	11h18.9m	+13°05'	10×3	9.3	22000000	狮子座	星系
M66	11h20.2m	+12°59'	9×4	9	22000000	狮子座	星系
M67	08h50.4m	+11°49'	30	6.9	2700	巨蟹座	疏散星团
M68	12h39.5m	+26°45'	12	8.2	46000	长蛇座	球状星团
M69	18h31.4m	−32°21'	4	7.7	24000	人马座	球状星团
M70	18h43.2m	−32°18'	8	8.1	65000	人马座	球状星团
M71	19h53.9m	+18°47'	7	8.3	8000	天箭座	球状星团
M72	20h53.5m	−12°32'	6	9.4	59000	宝瓶座	球状星团
M73	20h59.0m	−12°38'	3	8.9	2000	宝瓶座	疏散星团
M74	01h36.7m	+15°47'	10×10	9.2	32000000	双鱼座	星系
M75	20h06.1m	−21°55'	6	8.6	78000	人马座	球状星团
M76	01h42.4m	+51°34'	1	12.2	8000	英仙座	行星状星云
M77	02h42.7m	−00°01'	7×6	8.8	38000000	鲸鱼座	星系
M78	05h46.7m	+00°03'	8×6	–	1600	猎户座	弥散星团
M79	05h24.5m	+24°33'	9	8	43000	天兔座	球状星团
M80	16h17.1m	+22°59'	9	7.2	37000	天蟹座	球状星团

续 表:

编号	赤经	赤纬	视径	目视星等	距离(光年)	星座	注释
M81	09h55.6m	+69°04'	26×14	6.9	10000000	大熊座	星系
M82	09h55.8m	+69°41'	11×5	8.4	10000000	大熊座	星系
M83	13h37.0m	−18°52'	11×10	8	13000000	长蛇座	星系
M84	12h25.1m	+12°53'	5×4	9.3	41000000	室女座	星系
M85	12h25.4m	+18°11'	7×5	9.2	41000000	后发座	星系
M86	12h26.2m	+12°57'	7×6	9.2	20000000	室女座	星系
M87	12h30.8m	+12°24'	7×7	8.6	44000000	室女座	星系
M88	12h32.0m	+14°25'	7×4	9.5	41000000	后发座	星系
M89	12h35.7m	+12°33'	4×4	9.8	41000000	室女座	星系
M90	12h36.8m	+13°10'	10×5	9.5	41000000	室女座	星系
M91	12h35.4m	+14°30'	5×4	10.2	41000000	后发座	星系
M92	17h17.1m	+43°08'	11	6.5	26000	武仙座	球状星团
M93	07h44.6m	+23°52'	22	6.2	3600	船尾座	疏散星团
M94	12h50.9m	+41°07'	11×9	8.2	15000000	猎犬座	星系
M95	10h44.0m	+11°42'	7×5	9.7	29000000	狮子座	星系
M96	10h46.8m	+11°49'	7×5	9.2	29000000	狮子座	星系
M97	11h14.8m	+55°01'	3	12	2000	大熊座	行星状星云
M98	12h13.8m	+14°54'	10×3	10.1	36000000	后发座	星系
M99	12h18.8m	+14°25'	5×5	9.8	41000000	后发座	星系
M100	12h22.9m	+15°49'	7×6	9.4	41000000	后发座	星系
M101	14h03.2m	+54°21'	27×26	7.7	18000000	大熊座	星系
M102	15h06.5m	+55°46'	5×2	10	40000000	天龙座	星系
M103	01h33.2m	+60°42'	6	7.4	7500	仙后座	疏散星团
M104	12h40.0m	−11°37'	8×4	8.3	50000000	室女座	星系
M105	10h47.8m	+12°35'	5×4	9.3	30000000	狮子座	星系
M106	12h19.0m	+47°18'	18×8	8.3	15000000	猎犬座	星系
M107	16h32.5m	−13°03'	10	8.1	10000	蛇夫座	球状星团
M108	11h11.5m	+55°40'	8×3	10.1	23000000	大熊座	星系
M109	11h57.6m	+53°23'	8×5	9.8	55000000	大熊座	星系
M110	00h40.4m	+41°41'	17×10	8	2900000	仙女座	星系

主要流星群

序号	可见日期	辐射点		附近星座	特　征	ZHR 最大值	周期(年)
		赤经	赤纬				
1	1月2~5日	230	49	天龙座	迅速,路径长,暗,蓝色	120(变)	5
2	4月16~25日	210	–10	室女座	缓慢,火流星		
3	4月22~23日	271	33	天琴座	迅速,亮	18–90	415
4	5月3~10日	335	–2	宝瓶座	迅速,路径长	60(变)	76
5	6月22~30日	228	58	天龙座	缓慢		6
6	7月25日~8月10日	308	–12	白羊座	缓慢	4	3.6
7	7月27~8月1日	339	–16	宝瓶座	缓慢，两个辐射点,路径长	20	4.2
8	8月7~15日	45	57	宝瓶座	迅速,路径长,亮,黄色	100	120
9	8月下旬	287	50	英仙座	迅速,火流星,亮	3	7.8
10	8月下旬	4	45	天鹅座			
11	8月30~9月4日	89	39	仙女座	缓慢	7	
12	10月8~9日	262	54	御夫座	缓慢	周期性,可上千	6.6
13	10月18~23日	92	17	天龙座	迅速,有光迹	25	76
14	10月末~11月	43	22	猎户座	缓慢,生光		3.3
15	11月上旬	56	15	白羊座	缓慢,生光	5	3.3
16	11月14~19日	150	22	金牛座	迅速,路径长,青绿色	15+	33.2
17	11月17~23日	25	43	狮子座	缓慢,有余迹		6.7
18	11月20日	98	8	仙女座			
19	11月20~23日	56	22	猎户座	缓慢,亮流星	5	3.3
20	12月5日	15	–46	金牛座	缓慢,生光		
21	12月11~16日	111	33	凤凰座	迅速,路径短,亮流星很多,白色	120	1.6
22	12月21~23日	206	80	双子座	缓慢	10–50	14.4

我国主要城市经纬度

地名	北纬	东经		地名	北纬	东经	
		(° ′)	(h m)			(° ′)	(h m)
北京	39°54′	116°28′	7h46m	郑州	34°44′	113°42′	7h35m
天津	39°10′	117°10′	7h49m	开封	34°52′	114°23′	7h48m
石家庄	38°03′	114°26′	7h38m	洛阳	34°43′	112°26′	7h30m
保定	38°53′	115°28′	7h42m	许昌	34°00′	113°48′	7h35m
秦皇岛	39°54′	119°37′	7h58m	新乡	35°18′	113°54′	7h36m
承德	40°59′	117°52′	7h51m	武汉	30°37′	114°20′	7h37m
太原	37°51′	112°33′	7h30m	宜昌	30°42′	111°15′	7h25m
大同	40°07′	113°13′	7h33m	沙市	30°16′	112°17′	7h29m
呼和浩特	40°48′	111°38′	7h27m	长沙	28°12′	112°55′	7h32m
包头	40°35′	110°00′	7h20m	衡阳	26°55′	112°34′	7h30m
沈阳	41°48′	123°23′	8h14m	湘潭	27°54′	112°51′	5h31m
大连	38°54′	121°38′	8h07m	广州	23°10′	113°18′	7h33m
鞍山	41°04′	123°00′	8h12m	汕头	23°21′	116°40′	7h47m
锦州	41°09′	121°09′	8h05m	韶关	24°48′	113°33′	7h34m
长春	43°55′	125°18′	8h21m	海口	20°03′	110°10′	7h21m
吉林	43°48′	126°36′	8h26m	南宁	22°47′	108°21′	7h13m
哈尔滨	45°45′	126°38′	8h27m	桂林	25°18′	110°10′	7h21m
齐齐哈尔	47°22′	123°55′	8h16m	柳州	24°20′	109°19′	7h17m
上海	31°12′	121°26′	8h06m	成都	30°39′	104°04′	6h56m
南京	32°03′	118°46′	7h55m	重庆	29°33′	106°33′	7h06m
无锡	31°35′	120°18′	8h01m	内江	29°35′	105°03′	7h00m
苏州	31°20′	120°39′	8h03m	泸州	28°54′	105°27′	7h02m
徐州	34°16′	117°12′	7h49m	贵阳	26°34′	106°43′	7h07m
杭州	30°15′	120°10′	8h01m	遵义	27°45′	106°53′	7h08m
宁波	29°53′	121°34′	8h06m	昆明	25°03′	102°42′	6h51m
温州	28°00′	120°38′	8h03m	拉萨	29°39′	91°02′	6h04m
金华	29°10′	119°49′	7h59m	日喀则	29°16′	88°49′	5h55m
合肥	31°51′	117°16′	7h49m	西安	34°15′	108°55′	7h16m
芜湖	31°21′	118°20′	7h53m	宝鸡	34°21′	107°09′	7h09m
安庆	30°32′	117°02′	7h48m	延安	36°35′	109°26′	7h18m
福州	26°02′	119°19′	7h57m	兰州	36°03′	103°50′	6h55m
厦门	24°26′	118°04′	7h52m	天水	34°35′	105°33′	7h02m
泉州	24°54′	118°37′	7h54m	酒泉	39°44′	98°30′	6h34m
南昌	28°41′	115°53′	7h44m	西宁	36°37′	101°49′	6h47m
九江	29°43′	115°59′	7h44m	银川	38°28′	106°13′	7h05m
赣州	25°51′	114°56′	7h40m	乌鲁木齐	43°46′	87°36′	5h50m
济南	36°40′	117°02′	7h48m	哈密	42°50′	93°27′	6h14m
烟台	37°33′	121°20′	8h05m	喀什	39°27′	75°59′	5h04m
青岛	36°04′	120°19′	8h01m	台北	25°02′	121°31′	8h06m

2008—2028年我国可见日食

日　期	类型	主要地区的食分及食甚的时间(北京时间)
2008-08-01	全食	哈尔滨0.83(18时57分),乌鲁木齐0.98(19时05分),北京0.90(19时14分),兰州1.00(19时22分),武汉0.96(19时26分),拉萨0.82(19时33分),昆明0.83(19时33分)
2009-01-26	环食	昆明0.12(17时43分),武汉0.10(17时47分),上海0.15(17时47分),广州0.30(17时47分)
2009-07-22	全食	拉萨0.93(8时55分),昆明0.88(9时03分)兰,州0.83(9时07分),广州0.77(9时15分),武汉1.00(9时19分),北京0.75(9时23分),上海1.00(9时31分),哈尔滨0.50(9时47分)
2010-01-15	环食	乌鲁木齐0.39(16时11分),拉萨0.68(16时23分),兰州0.75(16时35分),昆明0.93(16时39分),北京0.80(16时44分),广州0.73(16时51分),武汉0.90(16时51分),上海0.83 (16时55分)
2011-01-04	偏食	乌鲁木齐0.21(18时15分)
2011-06-02	偏食	哈尔滨0.21(4时08分)
2012-05-21	环食	广州0.95(6时17分),昆明0.85(6时21分),武汉0.83(6时25分),上海0.88(6时25分),兰州0.65(6时33分),拉萨0.67(6时33分),北京0.69(6时37分),乌鲁木齐0.42(6时49分),哈尔滨0.67(6时49分)
2015-03-20	全食	乌鲁木齐0.06(19时23分)
2016-03-09	全食	拉萨0.12(8时46分),昆明0.23(8时46分),广州0.32(8时50分),武汉0.13(9时02分),上海0.18(9时13分)
2018-08-11	偏食	乌鲁木齐0.17(18时59分),北京0.35(18时54分),兰州0.19(18时59分),武汉0.17(19时06分)
2019-01-06	偏食	武汉0.08(8时21分),上海0.17(8时33分),北京0.30(8时34分),哈尔滨0.15(8时53分)
2019-12-26	环食	乌鲁木齐0.18(12时12分),拉萨0.40(12时12分),兰州0.23(13时14分),昆明0.42(13时14分),武汉0.32(13时46分),广州0.17(13时46分),北京0.18(13时42分),哈尔滨0.13(13时46分),上海0.35(14时02分)
2020-06-21	环食	乌鲁木齐0.62(14时59分),拉萨0.93(15时07分),昆明0.87(15时35分),兰州0.80(15时36分),哈尔滨0.37(15时51分),北京0.58(15时52分),广州0.90(15时51分),武汉0.87(16时00分),上海0.77分(16时07分)
2021-06-10	环食	乌鲁木齐0.27(20时26分)

2008—2028年合肥地区可见日食

日期	类型	初亏	高度(°)	食既	食甚	高度(°)	方位	生光	复圆	高度(°)	食分
2008-08-01	偏食	18:28:55	7	-	19:05(s)	0(s)	291	-	19:05(s)	0(s)	0.705(s)
2009-01-26	偏食	17:26:19	2	-	17:36(s)	0(s)	248	-	17:36(s)	0(s)	0.068(s)
2009-07-22	全食	08:18:25	36	9:30:46	9:31:45	51	97	9:32:46	10:52:07	68	1.076
2010-01-15	偏食	15:35:01	19	-	16:55:56	5	241	-	17:26(s)	0(s)	0.876
2012-05-21	偏食	05:17:49	1	-	6:20:34	13	74	-	7:31:11	28	0.821
2016-03-09	偏食	08:40:40	26	-	9:18:14	33	121	-	9:57:41	40	0.135
2018-08-11	偏食	18:31:38	5	-	18:56(s)	0(s)	288	-	18:56(s)	0(s)	0.19(s)
2019-01-06	偏食	07:42:24	5	-	8:28:35	13	127	-	9:19:02	21	0.161
2019-12-26	偏食	12:41:57	34	-	13:57:37	29	208	-	15:06:24	21	0.285
2020-06-21	偏食	14:36:41	57	-	16:01:22	39	276	-	17:14:21	24	0.798

注:引自 http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html,以合肥经纬度(31°51′N,117°16′E)计算。时间后面的"(s)"表示带食日落,其时间和太阳高度均为日落时刻的数值。

2008—2028 年我国可见月食

日期	类型	食分	初亏	高度(°)	食既	高度(°)	食甚	高度(°)	生光	高度(°)	复圆	高度
2008-08-17	偏食	0.808	03:36	23	–	–	05:10	5	–	–	06:44	-13
2010-01-01	偏食	0.076	02:53	54	–	–	03:23	47	–	–	03:53	41
2010-06-26	偏食	0.537	18:17	-12	–	–	19:38	3	–	–	21:00	16
2010-12-21	全食	1.256	14:33	-25	15:41	-16	16:17	-10	16:53	-4	18:01	9
2011-06-16	全食	1.7	02:23	25	03:22	17	04:13	9	05:03	1	06:02	-10
2011-12-10	全食	1.106	20:46	46	22:06	62	22:32	67	22:57	72	00:18	80
2012-06-04	偏食	0.37	18:00	-14	–	–	19:03	-2	–	–	20:06	10
2013-04-26	偏食	0.015	03:54	18	–	–	04:07	15	–	–	04:21	13
2014-10-08	全食	1.166	17:15	-6	18:25	8	18:55	14	19:24	20	20:34	35
2015-04-04	全食	1.001	18:16	-3	19:58	18	20:00	18	20:03	19	21:45	37
2017-08-07	偏食	0.246	01:23	39	–	–	02:20	33	–	–	03:18	25
2018-01-31	全食	1.315	19:48	27	20:52	40	21:30	47	22:08	55	23:11	67
2018-07-28	全食	1.609	02:24	29	03:30	20	04:22	12	05:13	2	06:19	-10
2019-07-17	偏食	0.653	04:02	13	–	–	05:31	-3	–	–	07:00	-20
2021-05-26	全食	1.009	17:45	-16	19:11	1	19:19	2	19:26	3	20:52	18
2021-11-19	偏食	0.974	15:19	-20	–	–	17:03	-2	–	–	18:47	19
2022-11-08	全食	1.359	17:09	-1	18:17	13	18:59	21	19:42	30	20:49	44
2023-10-29	偏食	0.122	03:35	35	–	–	04:14	27	–	–	04:53	19
2025-09-07	全食	1.362	00:27	51	01:31	46	02:12	41	02:53	35	03:56	24
2026-03-03	全食	1.151	17:50	-3	19:04	12	19:34	18	20:03	24	21:17	38
2028-07-06	偏食	0.389	01:09	32	–	–	02:20	27	–	–	03:30	18
2028-12-31	全食	1.246	23:08	74	00:16	81	00:52	78	01:28	72	02:36	58

注：引自 http://eclipse.gsfc.nasa.gov/JLEX/JLEX-index.html，以合肥经纬度(31°51′N，117°16′E)计算。高度为负表示月亮在地平以下。

责任编辑：郭行洲
封面设计：王　芳

Jichu Tianwenxue Jiaocheng

基础天文学教程

ISBN 978-7-212-03324-8

9 787212 033248 >

定价：27.00元